



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Estabilidad de un muelle de cajones bajo carga
considerando efectos tridimensionales**

Autor/a

Irene Font Pujulà

Tutor/a

Antonio Gens

Departament

Enginyeria del Terreny i Cartogràfica

Intensificació

Enginyeria del Terreny

Data

Maig 2010

RESUMEN

Estabilidad de un muelle de cajones bajo carga considerando efectos tridimensionales

Autora: Irene Font Pujulà

Tutor: Antonio Gens

Palabras clave: Efecto tridimensional, PLAXIS, muelle, deformación plana, factor de seguridad, MEF.

Habitualmente, la estabilidad de las estructuras portuarias se estudia considerando el problema bidimensional. Aunque esta aproximación a menudo deja los cálculos del lado de la seguridad, el comportamiento real de las estructuras no es puramente bidimensional ya sea por la propia geometría del problema o a las heterogeneidades que puede presentar el terreno.

El objetivo principal de la presente tesina consiste en el análisis del efecto tridimensional al considerar como estructuras individuales los cajones que conforman una alineación de muelle. Dicho análisis se llevará a cabo a partir de la modelización del problema mediante el empleo de programas basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF), concretamente los códigos PLAXIS 2D v8.6 y PLAXIS 3D Foundation.

Previamente al análisis del efecto tridimensional de las cargas sobre el muelle se realiza una calibración a partir de la elaboración de un modelo en deformación plana con PLAXIS 2D y simulando el mismo problema bidimensional mediante el código PLAXIS 3D Foundation. Dicha calibración se lleva a cabo a partir de la comparación de los resultados tanto en tensiones como en deformaciones. Una vez calibrado el modelo 3D se procede al estudio objeto del presente documento.

Para analizar el efecto tridimensional a partir de la variación del factor de seguridad a estabilidad global de las estructuras y el terreno considerando diferentes situaciones de carga, se ha elaborado un modelo consistente en una alineación de muelle formada por cinco cajones hormigón. Las diferentes hipótesis de carga a las que se han sometido los diferentes cajones han permitido abarcar desde el caso puramente tridimensional (carga sobre un único cajón del modelo) al caso asimilable al bidimensional o de deformación plana (cargando los cinco cajones que forman el modelo), con las situaciones intermedias que se puedan dar.

AGRADECIMIENTOS

En primer lloc voldria agrair al meu tutor, Antonio Gens, la dedicació que m'ha mostrat, la seva paciència, els seus consells i coneixements, i la seva implicació en tot moment al llarg d'aquesta tesina. I a en Dani Tarragó: quina paciència, Dani! Moltes gràcies per trobar-me sempre una estona. I a l'Albert Falqués Jr.: Albert, infinites gràcies per l'ajuda i consells, no només durant la tesina, sinó des de que un bon dia vaig començar en aquesta aventura que se'n diu geotècnia i en la que des de l'inici t'he tingut al costat.

Als companys d'Enginyeria Geològica, pels bons moments i les estones compartides. I a tu també Roger, per les anècdotes viscudes, les rialles, les coves inspeccionades, la paciència i, en definitiva, per ser diferent... quin guinu!

Als companys de Camins que m'han patit i amb qui he compartit aquests darrers anys: Aleix i Míriam, Ferran, Guillaume, Txema (Solé2), David, Jordi, Jose i Toni. I les estones que ens queden!!

A SENER per l'oportunitat que m'ha donat de treballar al costat de persones a les quals admiro i de les que dia rere dia aprenc i vaig creixent personal i professionalment.

Als amics de Figueres: Eva, Marc, Dolors, Edu D., Anna, Sergi, Laia, Isabel, Edu P., Ester, el meu cunyat (qui ho havia de dir!) i amic Albert... ja he acabat i no tinc excusa! Prepareu-vos...

I al meu gran tresor: els meus pares i la meva germana. No hi ha paraules que puguin expressar tot el que m'agradaria dir-vos i agrair-vos. Tot el que sóc és gràcies a vosaltres. Us estimo.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2	ESTADO DEL ARTE EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE MUELLES.....	5
2.1	Métodos para el análisis de estabilidad de estructuras portuarias	5
2.1.1	Métodos de Equilibrio Límite	5
2.1.2	Métodos Numéricos.....	6
2.2	Estado Límite Último (ELU) de Estabilidad global	6
2.3	Análisis de estabilidad tridimensional	9
3	ANTECEDENTES.....	13
3.1	Proceso constructivo Muelle Prat Fase II	14
4	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MODELIZACIÓN	17
4.1	Programas utilizados	17
4.1.1	Construcción por etapas	18
4.1.2	Tipos de elementos finitos empleados en el análisis 2D	18
4.1.3	Tipos de elementos finitos empleados en el análisis 3D	19
5	CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS.....	25
5.1	Modelos realizados para la calibración.....	25
5.2	Definición del modelo 2D	25
5.2.1	Geometría del problema	25
5.2.2	Propiedades de los materiales	26
5.2.3	Condiciones de contorno	27
5.2.4	Condiciones iniciales	27
5.2.5	Hipótesis de carga	28
5.2.6	Fases del análisis.....	29
5.3	Definición del modelo 3D	30
5.3.1	Geometría del problema	30
5.3.2	Propiedades de los materiales	32
5.3.3	Condiciones de contorno	34
5.3.4	Condiciones iniciales	35

5.3.5	Hipótesis de carga	35
5.3.6	Fases del análisis.....	35
5.4	Calibración del modelo y análisis de resultados	36
5.4.1	Comparación en desplazamientos.....	37
5.4.2	Comparación en tensiones.....	45
5.5	Análisis del Factor de Seguridad.....	49
6	EFFECTO TRIDIMENSIONAL.....	56
6.1	Geometría del problema	56
6.2	Hipótesis de carga en función del número de cajones cargados.....	58
6.2.1	Resultados Hipótesis 1 (Carga 1 cajón).....	61
6.2.2	Resultados Hipótesis 2 (Carga 2 cajones)	71
6.2.3	Resultados Hipótesis 3 (Carga 3 cajones)	80
6.2.4	Resultados Hipótesis 4 (Carga 5 cajones)	88
6.3	Hipótesis de carga en función de la geometría de la grúa.....	95
6.3.1	Resultados Hipótesis 5 (2 grúas cajón central - 0,5 cajones adyacentes)	97
6.3.2	Resultados Hipótesis 6 (0,5 grúa en dos cajones adyacentes).....	106
7	COMPARACIÓN Y RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	111
8	CONCLUSIONES	115
9	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	116
10	BIBLIOGRAFÍA	117

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Habitualmente, la estabilidad de las estructuras portuarias se estudia considerando el problema bidimensional. Aunque esta aproximación a menudo deja los cálculos del lado de la seguridad, el comportamiento real de las estructuras no es puramente bidimensional a pesar de que pueda considerarse como tal. Esto suele ser debido a la propia geometría del problema o a las heterogeneidades del terreno.

Un problema considerado siempre como una situación de deformación plana sería el de una alineación de muelle vertical formado por cajones de hormigón. A pesar de poder considerarse el problema bidimensional por estar todos los cajones que forman el muelle alineados y solidarizados mediante una superestructura, puede haber fases durante el proceso constructivo en que los cajones se comporten como estructuras individuales al no estar aún unidos entre ellos.

Un ejemplo del comportamiento individual de los cajones de una alineación de muelle sería el que se observó en enero de 2007 en Muelle Prat Fase I. La avería afectó a unos 660 metros del muro de muelle formado por 16 cajones de hormigón, cimentados sobre banqueta en su lado mar, con desplazamiento de los cajones hacia el interior de la dársena a distancias diversas, llegando el cajón más alejado a desplazarse unos 90 metros. Dejando de lado las causas por las que sucedió el fallo, puede observarse el comportamiento claramente tridimensional de las estructuras.



Figura 1. Avería Muelle Prat Fase I.

El objetivo principal de la presente tesina consiste en el análisis del efecto tridimensional al considerar como estructuras individuales los cajones que conforman la alineación de Muelle Prat Fase II. Dicho análisis se llevará a cabo observando la variación del factor de seguridad a estabilidad global de las estructuras y el terreno considerando diferentes situaciones de carga, abarcando desde el caso puramente tridimensional (sometiendo a carga un único cajón) al caso asimilable a bidimensional o de deformación plana (cargando e involucrando todos los cajones en el fallo), con las situaciones intermedias que se puedan dar.

Dicho análisis se realizará a partir del empleo de programas basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF), concretamente mediante los códigos PLAXIS v8.2 y PLAXIS 3D Foundation v2.1.

Los principales inconvenientes en el estudio del efecto tridimensional mediante el empleo de programas basados en el Método de los Elementos Finitos son el coste computacional que éstos requieren y la dependencia de los resultados de la calidad de la malla de cálculo. La dificultad en la generación de una malla de cálculo robusta puede ser el principal inconveniente por el que no se haya realizado gran cantidad de estudios sobre el tema que se trata en el presente documento.

Partiendo de un modelo 2D simplificado de Muelle Prat Fase II (mediante PLAXIS v8.2), y para llevar a cabo el estudio del efecto tridimensional se procederá una validación previa del modelo 3D (realizado mediante el código PLAXIS 3D Foundation v2.1). La metodología a seguir consistirá en una calibración del modelo tridimensional realizado a partir de un modelo de deformación plana, de práctica habitual y ampliamente contrastado (PLAXIS v8.2). La variación del factor de seguridad de las estructuras se analizará a partir del modelo tridimensional calibrado sometido a diferentes hipótesis de carga.

2 ESTADO DEL ARTE EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE MUELLES

2.1 MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE ESTRUCTURAS PORTUARIAS

Habitualmente, la estabilidad de las estructuras portuarias se estudia mediante los análisis habituales de estabilidad de taludes, considerando el problema bidimensional.

El análisis de la estabilidad de estructuras bidimensionales, como se consideran habitualmente los muelles y diques, se realiza frecuentemente con programas comerciales basados en diferentes metodologías de cálculo, consistentes en:

- Métodos de Equilibrio Límite
- Métodos numéricos.

Ambos métodos estudian los modos de fallo típicos en dicho tipo de estructuras, correspondientes a deslizamiento profundo, hundimiento y vuelco plástico. La práctica habitual de verificación de dichos modos de fallo se realiza a partir de las metodologías adoptadas en las ROM 0.5-05 (Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias).

En función del empleo de una u otra metodología es común la obtención de una gran disparidad de soluciones. En muchas ocasiones se observa como los factores de seguridad que se obtienen frente a un modo de fallo dependen enormemente del programa y de la metodología empleada. Incluso un mismo programa puede proporcionar resultados muy distintos en función de cómo se haya modelizado la malla o de las hipótesis consideradas.

2.1.1 MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

El uso de los métodos de equilibrio límite está amparado por la amplia experiencia que hay en su empleo para resolver problemas de estabilidad de taludes. En la actualidad, los métodos de equilibrio límite se utilizan básicamente para el cálculo de cargas de hundimiento y vuelco plástico de muelles y diques portuarios, siguiendo lo que se determina en las ROM 0.5-05.

Una limitación importante de dichos métodos es que no consideran la compatibilidad de deformaciones y desplazamientos. Por ello, su empleo debe hacerse prestando atención a las situaciones de concentración de tensiones y teniendo en cuenta la sensibilidad de los resultados a la variación de ciertos parámetros del problema.

Por lo tanto, cabe indicar que el uso de dichos métodos está siendo llevado mucho más allá de su propósito inicial, como es el análisis de estabilidad de taludes, y que previamente al empleo de éstos, debería analizarse el problema y obtenerse una idea de la distribución tensional, por ejemplo, mediante análisis elástico con elementos finitos.

2.1.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

En un principio, la finalidad del empleo de este tipo de métodos era únicamente calcular deformaciones y desplazamientos.

Para un correcto empleo de estos métodos, es necesario definir las relaciones tensión-deformación del material, conocer el estado tensional inicial, la evolución del proceso constructivo, etc. Además, se deberán elegir criterios relativos a las técnicas de reducción de resistencia, parámetros de control de rotura, etc.

La gran ventaja de estos métodos es que el resultado del cálculo produce el mecanismo de rotura pésimo. Es decir, definen la rotura de forma natural, de acuerdo con el estado tensional y la compatibilidad de deformaciones del problema en estudio. Pueden ser una excelente guía (tanto en la búsqueda de la línea de rotura pésima como en el estado tensional del conjunto) para el posterior análisis mediante métodos de equilibrio límite.

2.2 ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU) DE ESTABILIDAD GLOBAL

El objetivo del método de equilibrio límite es la obtención del mínimo coeficiente de seguridad de las posibles superficies de rotura tanteadas (en general circulares). Para la obtención de la superficie pésima de deslizamiento se requiere de un análisis previo del modelo y de una cierta habilidad del usuario para su determinación. Esta consideración es importante cuando se analiza la estabilidad global de la sección, debido a la multitud de

roturas a tantear sin saber, a priori, qué forma tendrá la pésima, ni el recorrido de la misma, por lo que será necesario tantear distintas superficies, variando su geometría, así como los ángulos de entrada y salida de la superficie buscando siempre la pésima.

En el empleo de los métodos numéricos para el análisis de estabilidad global se observa una cierta tendencia a que los factores de seguridad (FS) sean más bajos que en métodos de equilibrio límite (EL). Esto puede deberse posiblemente a los siguientes puntos:

- Las roturas pésimas encontradas por los Métodos Numéricos no fueron predefinidas como en análisis en Equilibrio Límite, por el usuario.
- El FS mínimo encontrado no responde estrictamente a un modo de fallo de estabilidad global, sino que pueden responder a una interacción entre diferentes mecanismos (por ejemplo, mezcla de hundimiento y vuelco plástico)
- Las metodologías de cálculo diferentes pueden dar lugar a FS diferentes para una misma rotura.

A modo de ejemplo se adjuntan a continuación los resultados obtenidos para un mismo muelle mediante ambas metodologías y que corroboran lo mencionado en los puntos anteriores. Las propiedades geotécnicas de los materiales son idénticas para todos los modelos realizados.

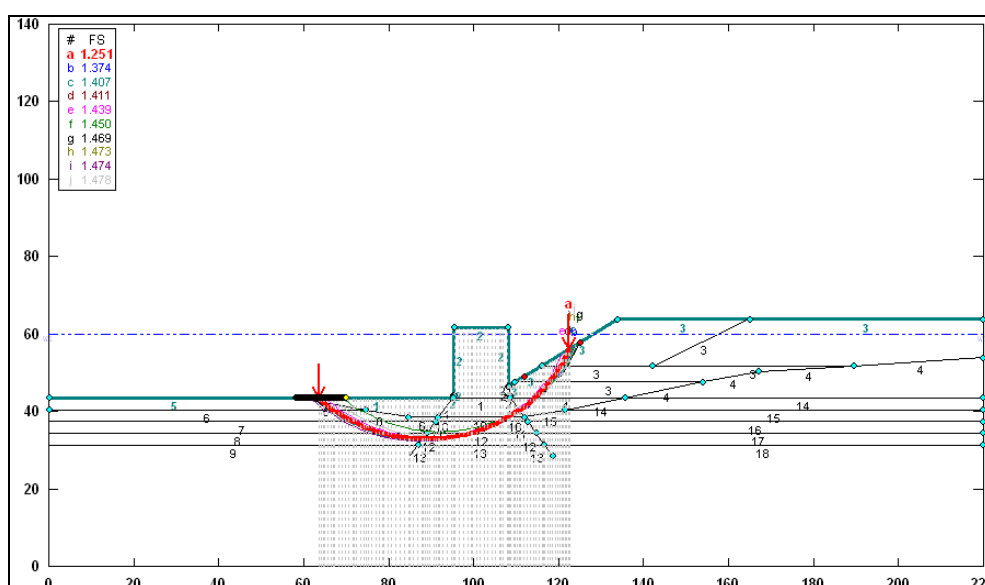


Figura 2. Resultado obtenido por métodos de equilibrio límite para la estabilidad global a corto plazo de un muelle. **FS obtenido: 1,25.**

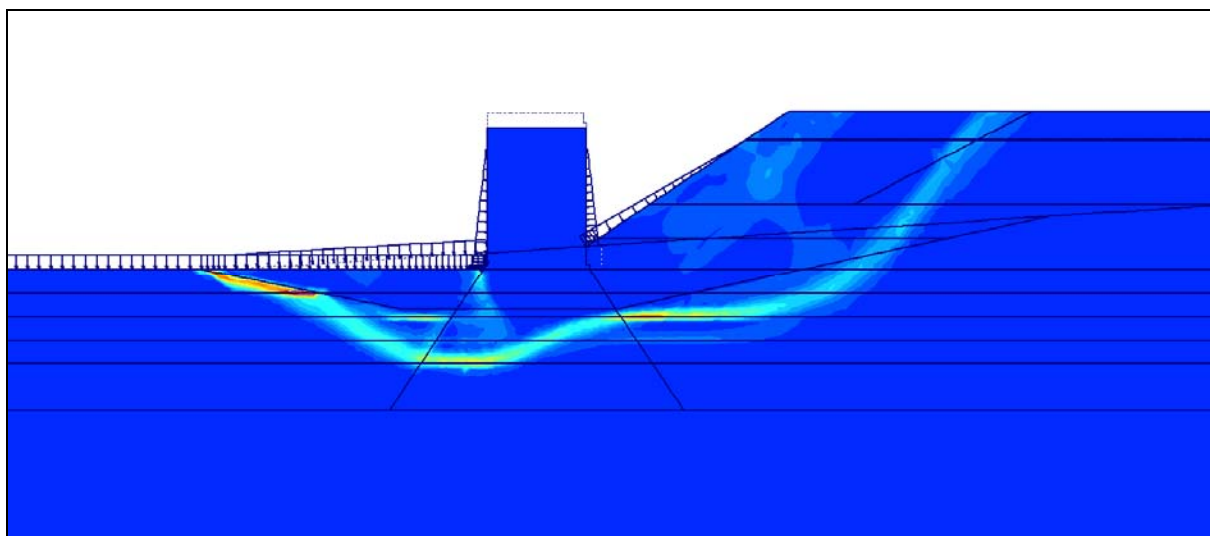


Figura 3. Resultado obtenido para la estabilidad global a corto plazo mediante elementos finitos del muelle de la figura anterior. **FS obtenido: 1,06.**

A partir del resultado obtenido mediante el método de los elementos finitos, se puede buscar por equilibrio límite un mecanismo de fallo similar (ver Figura 4).

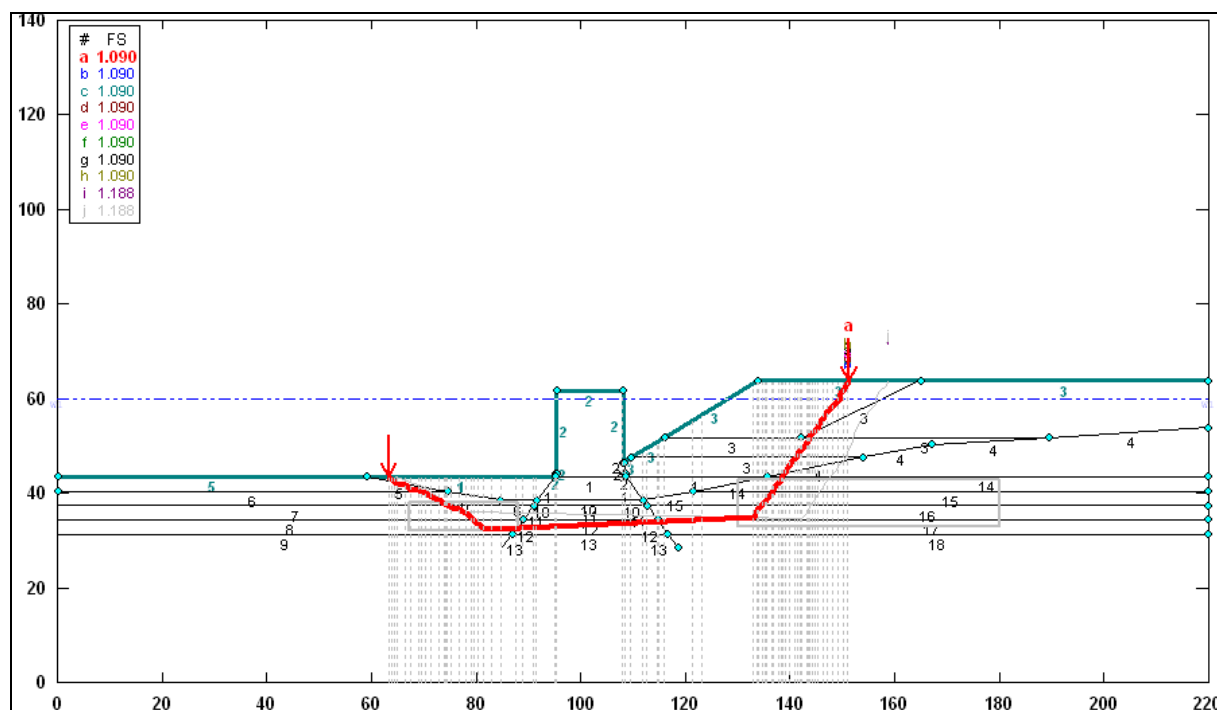


Figura 4. Resultado obtenido por métodos de equilibrio límite para la estabilidad global a corto plazo buscando rotura similar a la obtenida por elementos finitos. **FS obtenido: 1,09.**

Resulta evidente que la curva obtenida por elementos finitos define mejor el mecanismo de rotura que da lugar al factor de seguridad. No obstante, si se busca, por equilibrio límite, una rotura similar a la obtenida por elementos finitos, se obtiene un resultado similar en cuanto al factor de seguridad, tal y como se ve en la Figura 3 y Figura 4.

La conclusión que se extrae del presente apartado sería que para el análisis de estabilidad global de una estructura portuaria siempre debe buscarse la forma de rotura pésima, no necesariamente circular. En los métodos de Equilibrio Límite, en los que las posibles roturas a considerar las define el usuario, se recomienda estudiar roturas planas, poligonales, circulares, mixtas, diferentes ángulos de entrada y salida, etc. Esto hace que con los métodos de Equilibrio Límite a veces resulte difícil encontrar la rotura pésima.

Los métodos numéricos permiten estudiar la estabilidad conjunta del problema. De esta manera no es necesario analizar, de manera separada, los distintos modos de fallo habituales (deslizamiento, hundimiento, vuelco plástico, etc.) sino que este tipo de programas indican la rotura más desfavorable.

Por lo tanto, en base a lo explicado y teniendo en cuenta que el objetivo principal de la tesina es el análisis del efecto tridimensional en el factor de seguridad a estabilidad global de una alineación de muelle de cajones de hormigón, se considera oportuno el empleo de programas basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF) para la realización del estudio.

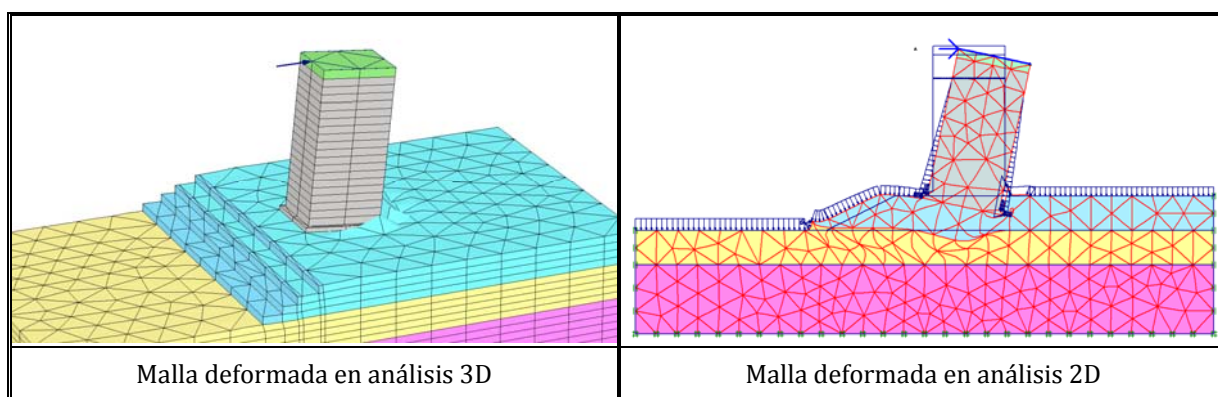
2.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRIDIMENSIONAL

Tal como se ha comentado anteriormente, en los análisis habituales de estabilidad de estructuras portuarias, se considera el problema bidimensional.

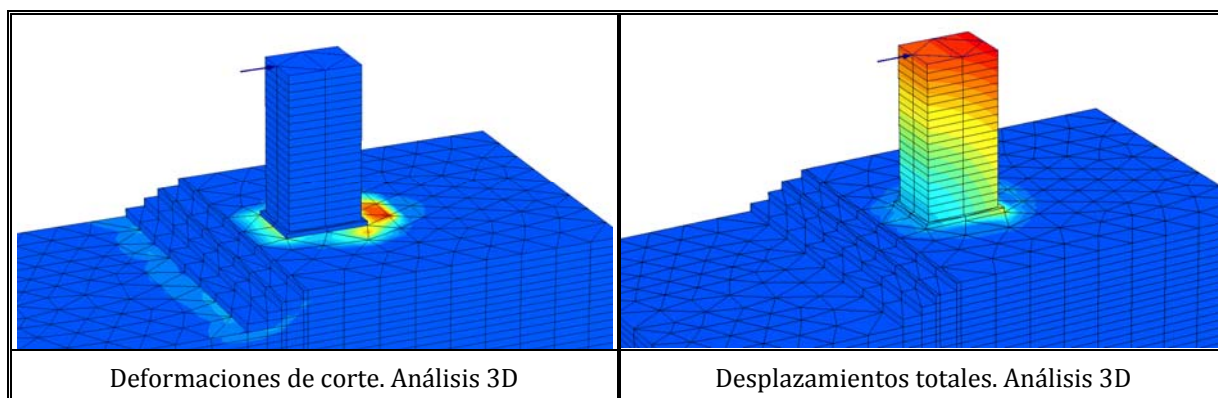
En realidad, sin embargo, la masa deslizante tiene siempre una longitud finita y definida y las fuerzas resistentes en lo que se podrían llamar las dos caras laterales de la masa deslizante juegan un papel, aumentando la resistencia contra el deslizamiento. Naturalmente que despreciar este efecto tridimensional es conservador y este criterio se

justifica en estructuras largas en comparación con su altura: no obstante, en estructuras altas y cortas en profundidad puede resultar conveniente estimar la influencia de las caras laterales de la rotura. Éste podría ser el caso de una alineación de muelle de cajones en que se considerara que no existe una superestructura que los solidarice, actuando éstos, como estructuras individuales frente a las cargas a los que se ven sometidos.

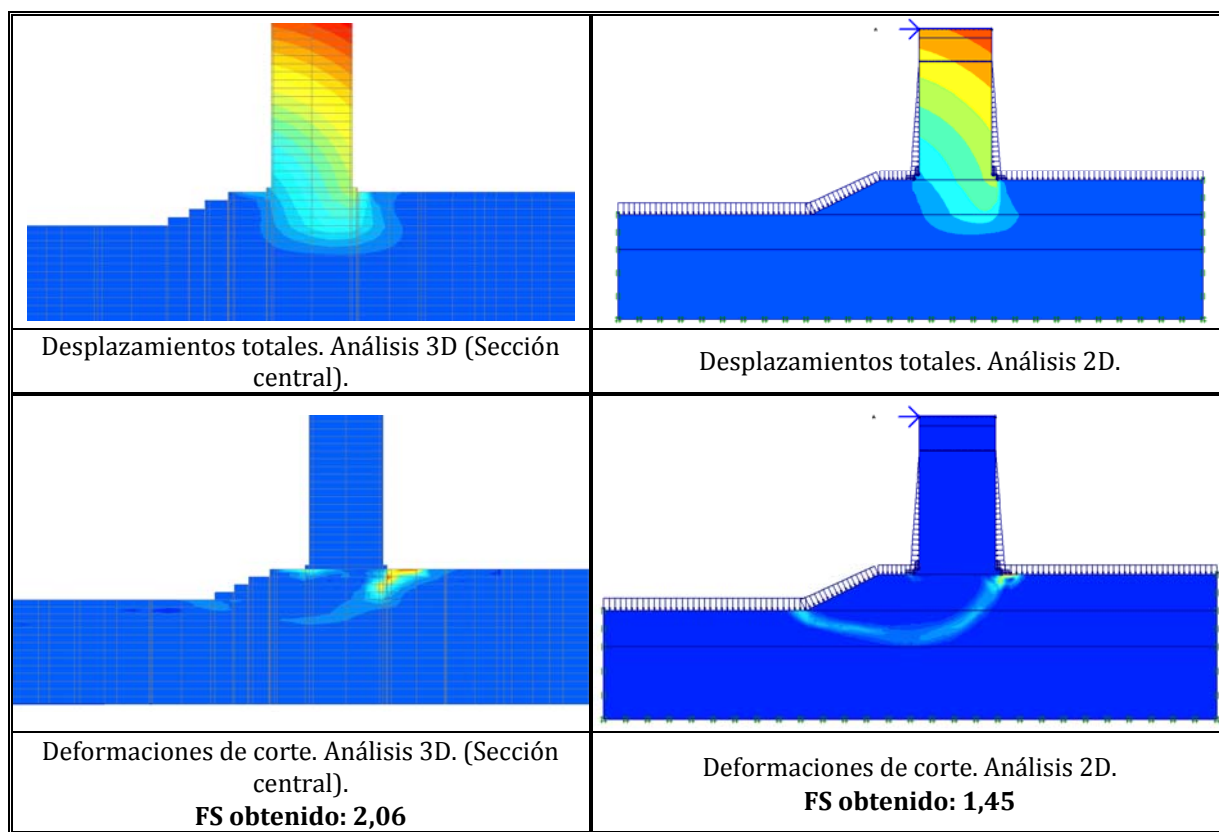
Se ha realizado, a modo de ejemplo, un análisis 2D y 3D de estabilidad de un cajón frente una carga de impacto de buque. A continuación se muestra la geometría deformada obtenida para ambos casos.



En las imágenes siguientes puede observarse claramente el efecto tridimensional del problema planteado.



De las figuras que se adjuntan a continuación puede observarse que los resultados son muy similares entre ambas modelizaciones. En el caso 3D, los resultados corresponden a una sección realizada por el centro del cajón.



Sin embargo, a pesar de que los resultados obtenidos son muy similares en ambas modelizaciones, los factores de seguridad resultantes frente el mecanismo de fallo asociado al problema son diferentes, obteniéndose un factor de seguridad mayor en el análisis 3D. Esta consecuencia deriva de tenerse en cuenta el efecto tridimensional del problema.

A pesar de tratarse de una cuestión poco desarrollada hasta el momento y de no existir gran cantidad de información específica sobre el tema objeto de estudio, de toda la documentación consultada sobre el análisis del efecto tridimensional en la estabilidad geotécnica se pueden extraer los siguientes puntos comunes a todos los estudios (Referencias [2], [3], [4], [5], [6] y [11]).

- Asumir condiciones de deformación plana en el cálculo de estructuras con una longitud finita conduce a resultados muy conservadores del factor de seguridad por el hecho de despreciar ciertas fuerzas resistentes conferidas por la propia geometría del mecanismo de fallo real. Por lo tanto, el análisis 2D es adecuado para un primer dimensionamiento de las estructuras, puesto que deja los cálculos de estabilidad del lado de la seguridad.

- El análisis 3D representa mejor la geometría del problema, la distribución de tensiones y presiones intersticiales y el mecanismo de fallo observados en la realidad.
- En general, aunque el análisis 2D resulta conservador en cuanto al estudio de la seguridad en la estabilidad geotécnica se refiere, mediante el análisis 3D se obtienen unos mecanismos de fallo más profundos (en función de la geometría del problema, entre un 10% y un 40%) que los obtenidos mediante el análisis 2D.

3 ANTECEDENTES

La necesidad que tiene el Port de Barcelona de disponer de nuevas superficies para uso portuario hace necesaria la construcción de una nueva terminal de contenedores en la zona de ampliación para poder atender la demanda existente. Con la finalidad de satisfacer dicha demanda, se proyectan y ejecutan las obras de Muelle Prat.

Muelle Prat se encuentra entre la antigua y la nueva desembocadura del río Llobregat, frente al término municipal del Prat de Llobregat (ver Figura 5).



Figura 5. Localización de Muelle Prat (fases I y II).

La construcción de los primeros 1.500 m del Muelle Prat se llevó a cabo en dos fases. La primera de ellas, denominada Muelle Prat Fase I, contemplaba la creación de 1.000 metros de línea de atraque y comenzó su construcción en el año 2004, finalizando en el otoño del 2005. Esta primera fase fue ejecutada con cajones de hormigón armado de 18,5 m de manga y vuelo de zapata de 1 m por cada lado, hasta alcanzar 20,5 m de anchura en solera. La eslora de los cajones fue 41,30 m, con un puntal de 17,5 m. El calado de proyecto se estableció a la cota -16,00 m.

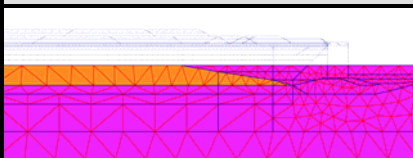
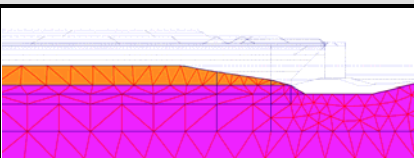
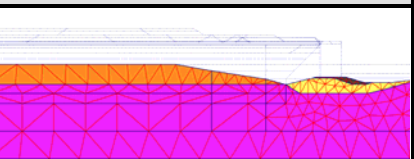
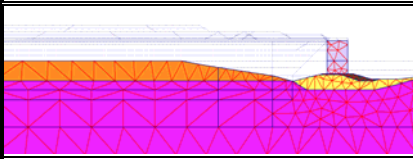
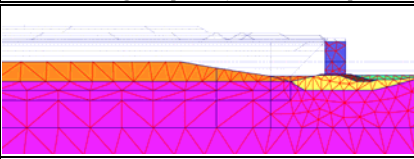
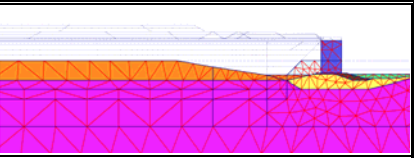
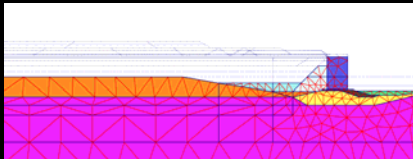
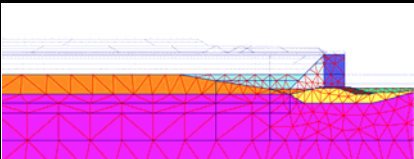
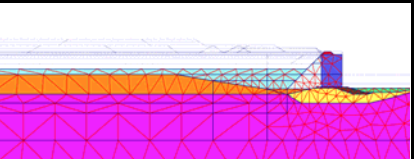
La Fase II, objeto de estudio de la presente tesina, de 500 metros de longitud, está formada por 12 cajones de hormigón armado de 13,56 m de manga en losa de cimentación y 12,07 m en fuste, con 41,30 m de eslora y 18,00 m de puntal, estableciéndose el calado de proyecto a la cota -16,50 m. En esta segunda fase se trasdosaron los cajones con material granular en toda la alineación de muelle.

Una vez concluidas las obras se dispondrá de una superficie total de 93 Ha, con una línea de atraque de 1.500 m y un calado mínimo de 16,5 m. El límite meridional de la prolongación coincide con el cambio de alineación de los muelles prevista en la ordenación de la dársena de ampliación.

Los terrenos sobre los que se cimenta la banqueta del muelle están constituidos por los materiales típicos de delta: una alternancia continua de capas de arenas y arcillas blandas con una elevada deformabilidad, hecho que hace prever unos asentamientos importantes, tanto primarios como secundarios.

3.1 PROCESO CONSTRUCTIVO MUELLE PRAT FASE II

Las diferentes fases constructivas de Muelle Prat Fase II, reproducidas mediante el modelo de cálculo realizado con el código PLAXIS (las características del cual se resumen más adelante) se resumen y muestran en la tabla siguiente.

FASES CONSTRUCTIVAS Y DE CÁLCULO EN MUELLE PRAT FASE II		
		
Fase 0. Tensiones iniciales.	Fase 1. Dragado para ejecución banqueta.	Fase 2. Ejecución banqueta.
		
Fase 3. Fondeo cajones con agua.	Fase 4. Relleno de celdas de los cajones.	Fase 5. Ejecución 1ª fase pedraplén (cota -9,0).
		
Fase 6. Ejecución 2ª fase pedraplén (cota -3,0) y 1ª fase relleno trasdós (cota -12,5).	Fase 7. Ejecución 3ª fase pedraplén (cota +2,0) y 2ª fase relleno trasdós (cota -9,0).	Fase 8. Ejecución mota sobre cajón y 3ª fase relleno trasdós (cota -6,0).

FASES CONSTRUCTIVAS Y DE CÁLCULO EN MUELLE PRAT FASE II		
		
Fase 9. Relleno trasdós (cota -3,0).	Fase 10. Relleno trasdós (cota 0,0).	Fase 11. Relleno trasdós (cota +1,5).
		
Fase 12. Vaciado trasdós tras rotura Fase I (hasta cota -4,0). Colocación del material movilizado en la caída en el pie del muelle.	Fase 13. Eliminación de la mota sobre el cajón. Etapa de Consolidación.	Fase 14. Relleno vertido terrestre (hasta cota 0,0). Ejecución 1ª fase pedraplén superior (cota 0,0).
		
Fase 15. Relleno vertido terrestre (hasta cota +1,5). Ejecución 1ª fase pedraplén superior (cota +1,5).	Fase 16. Ejecución capa drenante (hasta cota +2,0) y colocación de drenes en trasdós.	Fase 17. Activación de los drenes verticales.
		
Fase 18. Precarga zona almacenamiento (hasta cota +7,0) y relleno hasta cota +3,0.	Fase 19. Precarga zona almacenamiento (hasta cota +9,0 y +7,0). Precarga cajón (6,3 t/m²).	Fase 20. Precarga zona almacenamiento (hasta cota +10,5 y +7,0).
		
Fase 21. Ejecución columnas de grava.	Fase 22. Descarga precarga cajón.	Fase 23. Precarga zona maniobras (hasta cota +5,5). Relleno hasta cota +3,5.
		
Fase 24. Precarga zona maniobras (hasta cotas +7,0 y +5,5).	Fase 25. Descarga zona almacenamiento.	Fase 26. Descarga total trasdós (hasta cota +3,5).
		
Fase 27. Ejecución pavimento y superestructura. Dragado delantero del muelle (cota -16,5).	Fase 28. Etapa de servicio de la estructura. Carga de grúa y sobrecargas de uso en zona de maniobras.	Fase 29. Etapa de servicio de la estructura. Carga de grúa y sobrecargas de uso en zona de maniobras y almacenamiento.

Tabla 1. Fases de cálculo mediante PLAXIS para Muelle Prat Fase II.

Consideraciones del proceso constructivo y del modelo empleado

Fase 12: Durante el proceso de construcción de Muelle Prat fase II, parte del Muelle Prat Fase I sufrió una importante avería afectando a unos 660 metros de la alineación de muelle formado por 16 cajones de hormigón armado, con desplazamiento de los cajones hacia el interior de la dársena a distancias diversas. Dicho desplazamiento causó también la movilización de buena parte del material de relleno, que se dispersó por toda la dársena. Por lo tanto, después de la avería del Muelle Prat fase I, el nivel del terreno en el pie de toda la alineación de Muelle Prat fase II subió hasta la cota -14,0 en base a la información extraída de ensayos batimétricos realizados tras el fallo. Como actuación de seguridad se optó por aligerar el trasdós del muelle rebajando su cota de relleno hasta la -4,0. Cabe indicar que a partir de la avería sufrida por Muelle Prat fase I se procede a la ejecución de una serie de acciones a fin de mejorar las condiciones de estabilidad de las estructuras de la nueva terminal (instalación de drenes, precarga de los cajones, ejecución de columnas de grava y precarga de las explanadas).

Fase 16: Tras las fases de vertido terrestre hasta la cota +1,5 y previa colocación de las precargas terrestres, se procede a la ejecución de una capa drenante en la superficie de la explanada (hasta cota +2,0) y a la colocación de drenes verticales (hasta 20 metros de profundidad) con el fin de eliminar presiones de agua en el material de trasdós que pongan en riesgo la estabilidad de la estructura. Se estima que con la densidad de drenes prevista se produce el 90% de consolidación en 4 meses.

Fases 18 a 24: Tras la colocación de los drenes verticales y con el fin de acelerar el proceso de consolidación del material de trasdós, se procede a la colocación de precargas terrestres sobre la explanada de las zonas de almacenamiento y de maniobras. Dichas precargas se ejecutan con material no compactado procedente de vertidos hidráulicos.

Fase 21: Ejecución de columnas de grava. Éstas se incluyen en el modelo como un material equivalente, reemplazando al relleno existente y alcanzan profundidades de hasta 30 metros colocándose en los 30 m de relleno por detrás de los cajones. Se definen 2 materiales para las columnas de grava: al inicio las columnas en el terreno se considera que tienen un comportamiento únicamente friccional, y después de la consolidación se comportan como un material friccional y cohesivo (Fase 26).

4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MODELIZACIÓN

En el presente apartado se exponen las principales características de los programas utilizados para la realización de los modelos (PLAXIS v.8.2 y PLAXIS 3D Foundation v.2.1). Se describe el tipo de elementos finitos que se emplean para los cálculos, las características de los modelos constitutivos de terreno utilizados, así como las características de los elementos estructurales utilizados en la modelización.

4.1 PROGRAMAS UTILIZADOS

Las modelizaciones se han realizado a partir de dos análisis distintos: (1) análisis en dos dimensiones mediante la versión 8.6 del programa **PLAXIS**, y (2) análisis en tres dimensiones mediante la versión 2.2 del programa **PLAXIS 3D Foundation**, ambos programas basados en el método de los elementos finitos desarrollado en la Delft University of Technology (Países Bajos) orientados a resolver problemas geotécnicos en un espacio 3D y 2D respectivamente.

El programa **PLAXIS v8.6** es utilizado para llevar a cabo análisis de elementos finitos en dos dimensiones. En este caso el modelo de elementos finitos será de deformación plana, ya que se considera a priori que la geometría tiene una sección transversal uniforme para la que puede suponerse que los correspondientes estados tensionales y de cargas son uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección transversal al plano de estudio. Los desplazamientos y deformaciones en la dirección se consideran nulos.

PLAXIS 3D Foundation v2.2 permite llevar a cabo el análisis de problemas geotécnicos en un espacio 3D simulando el comportamiento del terreno, teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura y el comportamiento de los elementos estructurales.

Las principales características de PLAXIS, tanto para la modelización 2D como 3D utilizadas en este análisis se presentan en los siguientes apartados.

4.1.1 CONSTRUCCIÓN POR ETAPAS

La construcción por etapas es el procedimiento de introducción de carga utilizado por PLAXIS. Mediante este procedimiento, es posible cambiar la configuración de la geometría y de la carga desactivando o reactivando cargas, dominios de suelo u objetos estructurales que hayan sido creados durante la definición de la geometría.

La construcción por etapas permite una simulación precisa y realista de diversos procesos de carga, construcción y excavación. Esta opción puede también ser utilizada para reasignar conjuntos de datos de material.

En el proceso de construcción por etapas se especifica el estado que debe ser alcanzado al final de la fase de cálculo, ya sea cambiando la geometría, la magnitud de las cargas, su configuración o la distribución de presiones de agua. El cálculo de la fase termina cuando se alcanza el estado o el nivel de carga especificados (nivel último de avance de la carga) o cuando se detecta rotura del suelo.

Durante el cálculo de construcción por etapas, un multiplicador que controla el proceso de la construcción por etapas (ΣM_{stage}) se incrementa desde cero hasta el nivel último (generalmente 1,0).

4.1.2 TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS 2D

La malla de elementos finitos utilizada en el análisis 2D contiene un solo tipo de elementos: (1) elementos tipo "soil", empleados para modelar los distintos materiales que componen capas de suelo. A cada elemento tipo "soil" se le asigna un modelo constitutivo de terreno y los correspondientes parámetros geotécnicos que lo definen.

El tipo de elementos empleado han sido elementos triangulares de 15 nodos, proporcionando una interpolación de cuarto orden para los desplazamientos. La integración numérica implica 12 puntos de Gauss (puntos de evaluación de tensiones).

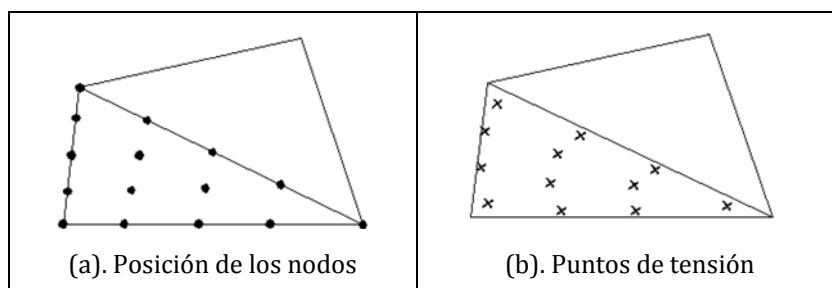


Figura 6. Posición de los nodos y los puntos de tensión en elementos de suelo triangulares de 15 nodos en 2D.

Como las propiedades de los modelos constitutivos asignadas a los materiales (elementos tipo "soil") del modelo 2D son idénticas a las usadas en el modelo 3D, dicho tipo de elementos se describe más adelante, en la definición de los tipos de elementos finitos empleados en el análisis 3D.

Se han utilizado las mismas propiedades para los elementos tipo "soil" en ambos modelos para asegurar al máximo la bondad de la correlación entre los resultados obtenidos.

4.1.3 TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS 3D

La malla de elementos finitos utilizada en el análisis en tres dimensiones contiene cuatro tipos de elementos: (1) elementos tipo "soil", empleados para modelar los distintos materiales que componen capas de suelo, (2) elementos tipo "floor", usados para modelar elementos estructurales horizontales (en este caso, la solera del cajón), (3) elementos tipo "wall" para modelar elementos estructurales verticales (en este caso, utilizados para simular las paredes de los cajones con su correspondiente interfase con el terreno). Todos estos elementos se pueden activar, desactivar o variar sus propiedades en las distintas fases de la modelización.

4.1.3.1. ELEMENTOS TIPO "SOIL"

Los elementos tipo "soil" se emplean para modelar elementos tridimensionales de suelo que pertenecen al área de estudio. PLAXIS emplea elementos volumétricos de 15 nodos que proporcionan una interpolación de segundo orden para los desplazamientos. A cada

elemento tipo “soil” se le asigna un modelo constitutivo y los correspondientes parámetros geotécnicos que lo definen.

El tipo de elementos empleado son prismas triangulares de 15 nodos. Estos elementos están compuestos por dos caras triangulares de 6 nodos en los planos horizontales, generados en un proceso de mallado 2D, y por 3 caras cuadrilaterales en la dirección perpendicular a las caras triangulares. Cada prisma triangular generado contiene 6 puntos de tensión o puntos de integración de Gauss.

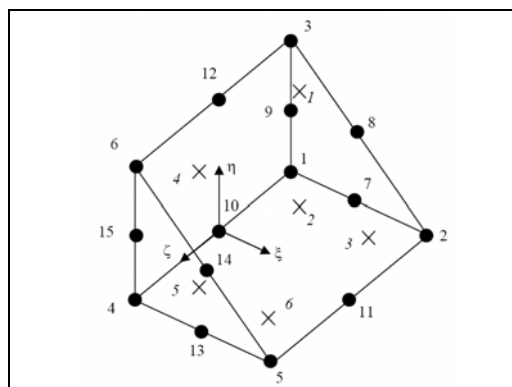


Figura 7. Posición de los nodos y los puntos de tensión en elementos de suelo triangulares de 15 nodos en 3D.

Los modelos constitutivos empleados en el análisis para los elementos tipo "soil" han sido los de Mohr-Coulomb, Soft Soil Creep y material Elástico Lineal, considerados los más apropiados en base a la información geotécnica disponible.

Modelo Mohr-Coulomb

Se trata de un modelo elastoplástico perfecto y con elasticidad lineal. La existencia o no de plasticidad se controla mediante una función de plasticidad que depende de las tensiones y las deformaciones. Esta función define una superficie de fluencia que por ser un modelo elastoplástico perfecto se mantiene fija. De este modo, un estado tensional que se encuentra dentro de la superficie de fluencia presenta un comportamiento elástico y por lo tanto las deformaciones que se producen son reversibles. La Tabla 2 muestra los parámetros utilizados para definir este modelo.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
γ_{dry}	Peso específico seco	kN/m^3
γ_{wet}	Peso específico saturado	kN/m^3
E	Módulo de Young	kN/m^2
ν	Módulo de Poisson	-
c	Cohesión	kN/m^2
φ	Ángulo de rozamiento interno	$^\circ$
ψ	Ángulo de dilatancia	$^\circ$

Tabla 2. Parámetros del modelo Mohr-Coulomb.

Modelo Soft Soil Creep

Se trata de un modelo tipo CamClay que puede ser utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos donde se espera que no tenga lugar la dilatancia del material, como arcillas normalmente consolidadas.

El modelo Soft Soil Creep permite estudiar la consolidación secundaria analizando la fluencia, mediante el parámetro de consolidación secundaria $C\alpha$. En el modelo este parámetro ha sido transformado primero a su forma diferencial y posteriormente extendido a una forma más general incorporando conceptos del modelo Cam Clay y de la teoría de la viscoplasticidad. En este sentido las elipses del modelo Cam Clay son usadas como contornos de velocidades constantes de deformación volumétrica de forma que, a medida que nos alejamos de la condición normalmente consolidada, la velocidad de deformación por fluencia es cada vez más pequeña. Asimismo, la formulación del modelo permite alcanzar estados de sobreconsolidación tanto por fluencia como por descargas.

En resumen, algunas de las características del comportamiento de un suelo blando que se pueden capturar con este tipo de modelo de acuerdo con la formulación empleada son: (1) la rigidez de las tensiones; (2) el modelo distingue entre procesos de carga primaria y procesos de recarga-descarga; (3) incorpora compresión secundaria (dependencia de tiempo) que depende del OCR; (4) incorpora memoria de la presión de preconsolidación y (5) rotura de acuerdo con el criterio de Mohr-Coulomb.

La Tabla 3 muestra los parámetros utilizados para definir este modelo.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
γ_{dry}	<i>Peso específico seco</i>	kN/m^3
γ_{wet}	<i>Peso específico saturado</i>	kN/m^3
k_x	<i>Permeabilidad en horizontal</i>	m/d
k_y	<i>Permeabilidad vertical</i>	m/d
λ^*	<i>Índice de compresibilidad modificado</i>	-
κ^*	<i>Índice de hinchamiento modificado</i>	-
μ^*	<i>Índice de fluencia modificado</i>	-
c	<i>Cohesión</i>	kN/m^2
φ	<i>Ángulo de rozamiento interno</i>	$^\circ$
ψ	<i>Ángulo de dilatancia</i>	$^\circ$

Tabla 3. Parámetros del modelo Soft Soil Creep.

Modelo Elástico Lineal

Se trata de un modelo elástico lineal. Éste tipo de modelo de material se ha empleado únicamente en la modelización 3D del problema, puesto que se ha utilizado para modelizar las paredes perimetrales que conforman el cajón (espesor 0,30 m) y para la solera de hormigón del mismo (espesor 0,40 m). La tabla siguiente muestra los parámetros utilizados para definir este modelo. Los parámetros asignados son los que se indican a continuación:

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
γ_{dry}	<i>Peso específico seco</i>	kN/m^3
γ_{wet}	<i>Peso específico saturado</i>	kN/m^3
E	<i>Módulo de Young</i>	kN/m^2
ν	<i>Módulo de Poisson</i>	-

Tabla 4. Parámetros del modelo elástico.

4.1.3.2. ELEMENTOS TIPO "FLOOR"

Este tipo de elementos se ha empleado únicamente en la modelización 3D del problema analizado. Los elementos tipo "floor" modelan objetos horizontales de poco espesor que presentan una importante rigidez a flexión. Cada elemento está formado por seis nodos con seis grados de libertad por nodo (tres de traslación y tres de rotación) con tres puntos de Gauss.

El comportamiento de estos elementos se basa en la teoría de vigas de Mindlin. Concretamente se han usado elementos "floor" de tipo elástico lineal isótropo. Los parámetros empleados para definir este modelo son los reflejados en la Tabla 5.

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>UNIDADES</i>
d	<i>Espesor del elemento</i>	m
γ	<i>Peso específico del elemento</i>	kN/m^3
E	<i>Módulo de Young</i>	kN/m^2
ν	<i>Módulo de Poisson</i>	-

Tabla 5. Parámetros de los elementos tipo "floor".

Este tipo de elemento se ha utilizado para modelizar la solera de los cajones que conforman el muelle.

4.1.3.3. ELEMENTOS TIPO "WALL"

Como en el caso de los elementos tipo "floor", este tipo de elementos se ha empleado únicamente en la modelización 3D. Los elementos tipo "wall" son apropiados para modelizar estructuras verticales en el terreno con rigidez a la flexión. Los elementos tipo "wall" se componen a partir de placas cuadradas de 8 nodos con 6 grados de libertad por nodo (3 de desplazamiento y 3 de rotación). Este tipo de elemento también se basa en la teoría de placas de Mindlin. Los principales parámetros que utiliza este modelo son los que se detallan en la siguiente tabla:

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>UNIDADES</i>
d	<i>Espesor del elemento</i>	m
γ	<i>Peso específico del elemento</i>	kN/m^3
E	<i>Módulo de Young</i>	kN/m^2
ν	<i>Módulo de Poisson</i>	-

Tabla 6. Parámetros de los elementos tipo "wall".

5 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

En el presente apartado se la metodología seguida en la realización del modelo 3D y la validación de éste mediante una calibración a partir un modelo de deformación plana simplificado de Muelle Prat Fase II (PLAXIS v8.2).

5.1 MODELOS REALIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN

Para llevar a cabo el análisis del efecto tridimensional, previamente se realiza la calibración del modelo. Para dicha calibración, se analiza la situación como un problema de deformación plana mediante los programas PLAXIS 2D v8.6 y PLAXIS 3D Foundation v2.2.

Para la simulación del problema planteado en deformación plana mediante un modelo 3D bastaría con un modelo de un ancho mínimo de entre 1,0 m y pocos metros con las condiciones de contorno adecuadas, pero debido a las dimensiones que deberá tener el modelo para el análisis del comportamiento tridimensional, se lleva a cabo la modelización 3D en deformación plana para dos anchos de modelo distintos: 10,0 m y 125,0 m.

Por lo tanto, la calibración del modelo mediante la simulación del problema en deformación plana ha consistido en la realización de tres (3) modelos:

- Modelo 2D: Deformación plana.
- Modelo 3D: Simulación problema de deformación plana. Ancho modelo: 10,0 m.
- Modelo 3D: Simulación problema de deformación plana. Ancho modelo: 125,0 m.

5.2 DEFINICIÓN DEL MODELO 2D

5.2.1 GEOMETRÍA DEL PROBLEMA

A fin de determinar la estabilidad del muelle de cajones y el comportamiento del terreno adyacente, se ha realizado un modelo 2D, la geometría del cual es la que se muestra en la figura siguiente:

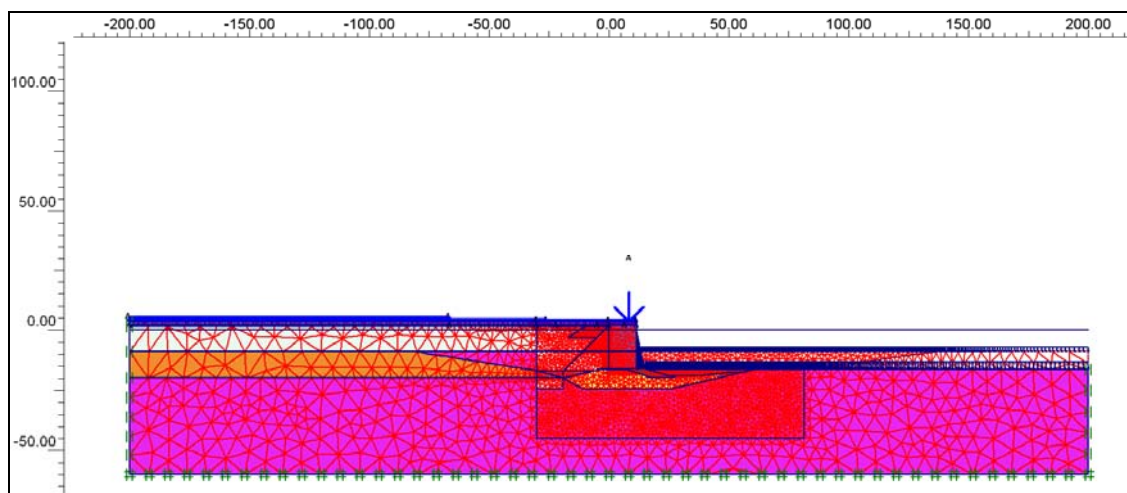


Figura 8. Malla para el análisis de estabilidad del muelle de cajones.

La malla de elementos finitos se ha refinado alrededor del muelle, en su trasdós y en el terreno subyacente. En la figura siguiente se muestra el detalle del área del modelo con la malla refinada.

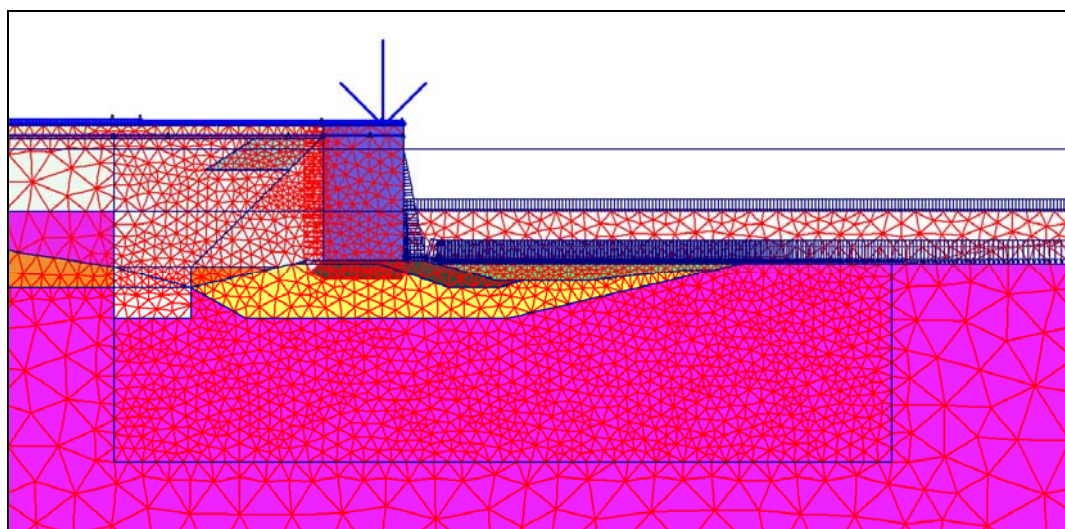


Figura 9. Detalle del área de la malla refinada para el análisis de estabilidad del muelle.

5.2.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Para el análisis 2D se han utilizado únicamente elementos tipo “soil”, los cuales tienen las siguientes características en función del modelo constitutivo de terreno asignado:

UNIDAD	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν (-)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Relleno arena	16,5	18,5	30.000	0,30	1,0	30
Pedraplen	18,0	20,0	35.000	0,30	1,0	42
Pedraplen superior	18,0	20,0	35.000	0,30	1,0	35
Escollera	18,0	20,0	35.000	0,30	1,0	42
Todo uno	18,0	20,0	35.000	0,30	1,0	38
Columnas grava	17,0	19,0	30.000	0,30	1,0	24
Columnas grava mejoradas	17,0	19,0	30.000	0,30	30,0	24
Precarga terrestre	18,0	18,0	30.000	0,30	10,0	32

Tabla 7. Propiedades de los materiales del modelo de Mohr-Coulomb (materiales de relleno y terreno natural).

SÍMBOLO	γ_{wet}	E	ν
Cajón	20,2	2e+06	0,25

Tabla 8. Parámetros del modelo elástico (cajones).

UNIDAD	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	k_x (m/d)	k_y (m/d)	λ^* (-)	κ^* (-)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Arcilla-limo	16,5	18,5	8,6E-3	8,6E-4	0,05	0,01	1,0	20
Relleno dren	18,5	18,5	1,0	1,0	0,05	0,01	1,0	20
Relleno hidráulico	17,0	19,0	1,0	1,0	0,05	0,01	1,0	20
Relleno 16	16,0	16,0	8,6E-4	8,6E-4	0,05	0,01	1,0	20

Tabla 9. Propiedades de los materiales del modelo de Soft Soil (terreno natural y relleno trasdós).

5.2.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Se han utilizado condiciones de contorno del tipo: (1) desplazamientos horizontales impedidos en los contornos verticales; (2) desplazamientos verticales y horizontales impedidos en el contorno inferior y (3) desplazamientos totales libres en la superficie del terreno. No se han impuesto condiciones de contorno de tipo hidráulicas.

5.2.4 CONDICIONES INICIALES

Se ha considerado la lámina libre situada en la cota correspondiente al nivel medio del mar (cota +0,00). Las tensiones iniciales se han determinado mediante los valores de los coeficientes de empuje al reposo en condiciones normalmente consolidadas (K_{0NC}) fijadas

para cada material, calculados empleando la fórmula de Jaky ($K_{0NC}=1-\sin\phi$). Las tensiones verticales en cada punto se han calculado a partir del peso específico del material suprayacente. Las tensiones horizontales se obtienen multiplicando las tensiones verticales por el coeficiente de empuje al reposo correspondiente.

5.2.5 HIPÓTESIS DE CARGA

Se ha considerado la siguiente configuración de acciones en fase de servicio para la verificación de la estabilidad global del muelle.

Acción	Valor característico	x_f
Grúa sobre cajón (Carga vertical puntual)	476 kN/m	Distancia del borde del cantil: 3,0 m.
Sobrecarga de tráfico y equipos	20 kN/m ²	Desde el borde del cantil hasta un ancho de 37,5 m sobre la explanada ($x=-26,0$ m).
Sobrecarga de almacenamiento y estacionamiento	30 kN/m ²	Desde $x=-26,0$ m hasta $x=-66,5$ m (ancho de 40,5 m)
Sobrecarga de almacenamiento y estacionamiento	70 kN/m ²	Desde $x=-66,5$ m hasta final del modelo (ancho de 133,5 m)

Tabla 10. Sobrecargas consideradas en el cálculo.

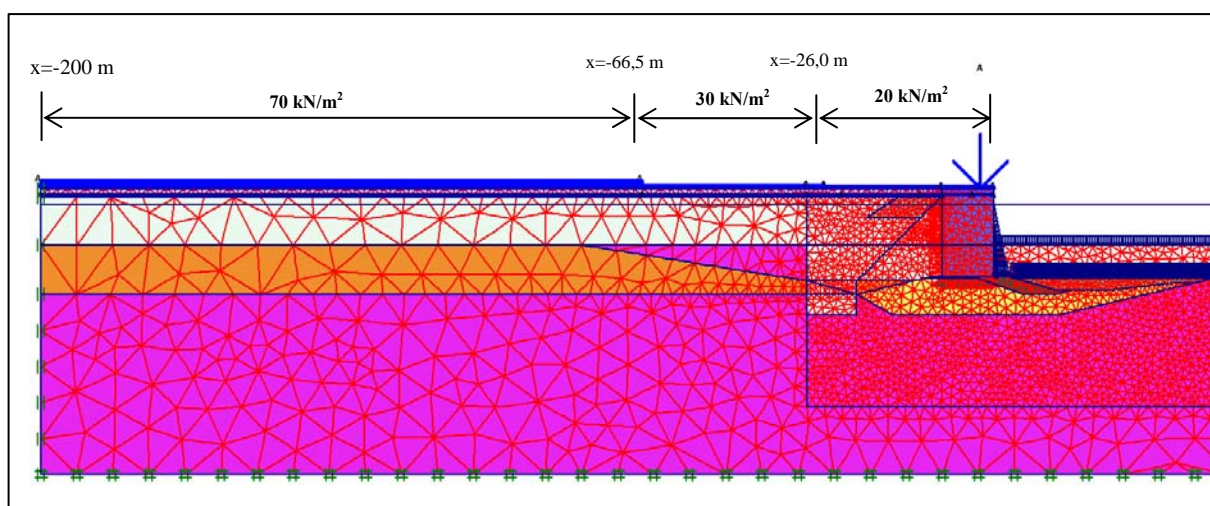


Figura 10. Configuración de las sobrecargas sobre el muelle y en su trasdós.

5.2.6 FASES DEL ANÁLISIS

En base a las fases constructivas mostradas en el Apartado 3.1 y con objeto de reducir el tiempo de cálculo de los modelos, se ha optado por modelizar el problema mediante un proceso constructivo equivalente al real en cuanto a resultados finales se refiere (fase de servicio de la estructura). Las fases constructivas consideradas para la construcción del muelle se resumen en la tabla siguiente:

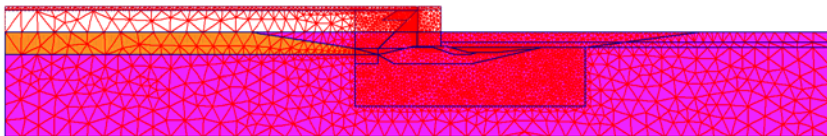
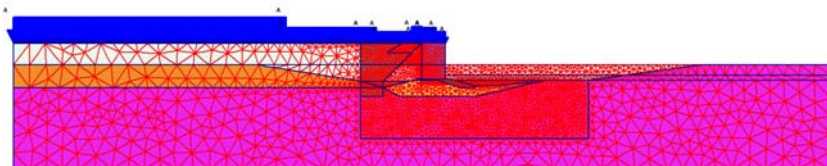
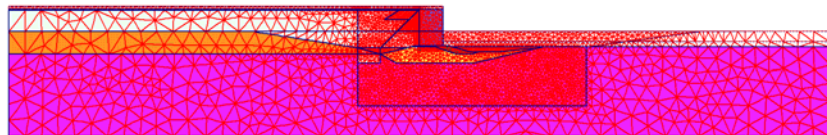
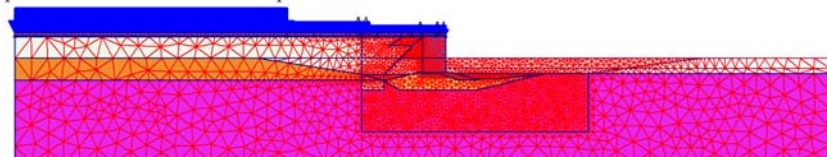
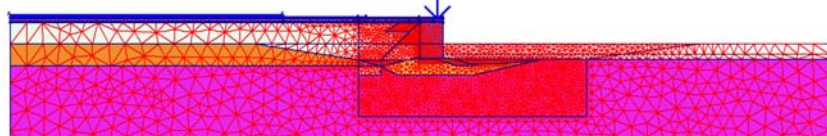
FASES DE LA MODELIZACIÓN PLAXIS V8.6	DESCRIPCIÓN
	<p>Fase 0. Tensiones iniciales</p>
	<p>Fase 1. Construcción y trasdosado del muelle de cajones hasta la cota +2,0. (Se ha considerado proceso drenado). Las sobrecargas representan la sobrecarga debida a las precargas terrestres sobre el muelle y en su trasdós.</p>
	<p>Fase 2. Dragado lado mar del muelle y retirada de las precargas terrestres. Las columnas de grava han mejorado sus propiedades resistentes. (Se ha considerado proceso drenado).</p>
	<p>Fase 3. Puesta en servicio de la estructura. Sobrecargas de tráfico y equipos y estacionamiento y almancenamiento. (Se ha considerado proceso no drenado).</p>
	<p>Fase 4. Fase servicio de la estructura. Acción de la grúa sobre el muelle. (Se ha considerado proceso no drenado).</p>

Tabla 11. Fases de la modelización en el análisis 2D.

5.3 DEFINICIÓN DEL MODELO 3D

5.3.1 GEOMETRÍA DEL PROBLEMA

La geometría del modelo 3D responde a las mismas características geométricas que la realizada mediante el modelo 2D en sección, pero se ha asignado en este caso un ancho para simular el problema de deformación plana.

Tal como se ha comentado anteriormente, para ajustar, validar y calibrar el modelo 2D con el modelo 3D, se ha llevado a cabo la realización de dos modelos 3D (con simulación del problema de deformación plana) con diferentes anchos con el fin de comprobar la influencia que pudiese tener este factor en los resultados. Los modelos realizados responden a los anchos de 10,0 m y 125,0 m.

La sección transversal del modelo 3D responde a la mismas características que el modelo 2D. Aún así, por las propias limitaciones del programa, se ha variado sensiblemente la geometría de la sección transversal para asimilarla a la del modelo 2D. Dichas limitaciones se basan en que la geometría del problema se define en el programa **PLAXIS 3D Foundation v2.2** a partir de planos horizontales. Tanto la geometría como el mallado se define y realiza en dichos planos horizontales y se extruye hasta el siguiente plano horizontal; es decir, el programa no permite la definición de planos inclinados para la introducción de la geometría.

Las geometrías a partir de la cual se han realizado los cálculos para el modelo 3D se muestran en las figuras siguientes.

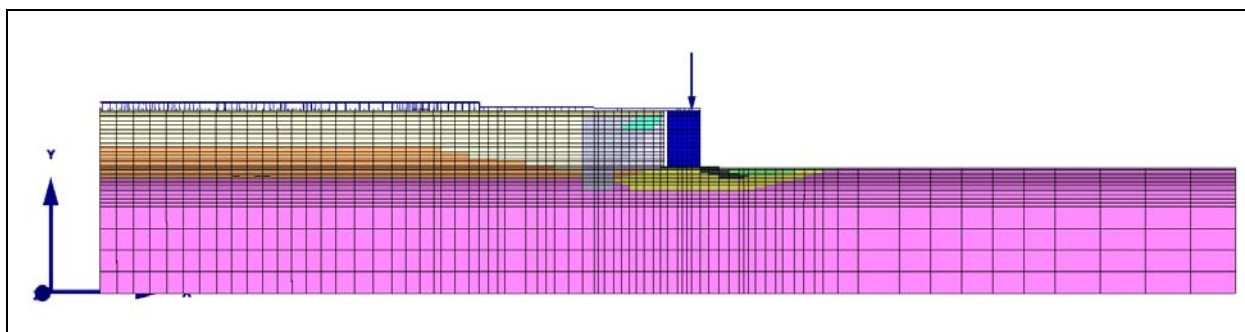


Figura 11. Malla frontal para el análisis de estabilidad del muelle. Modelo 3D.

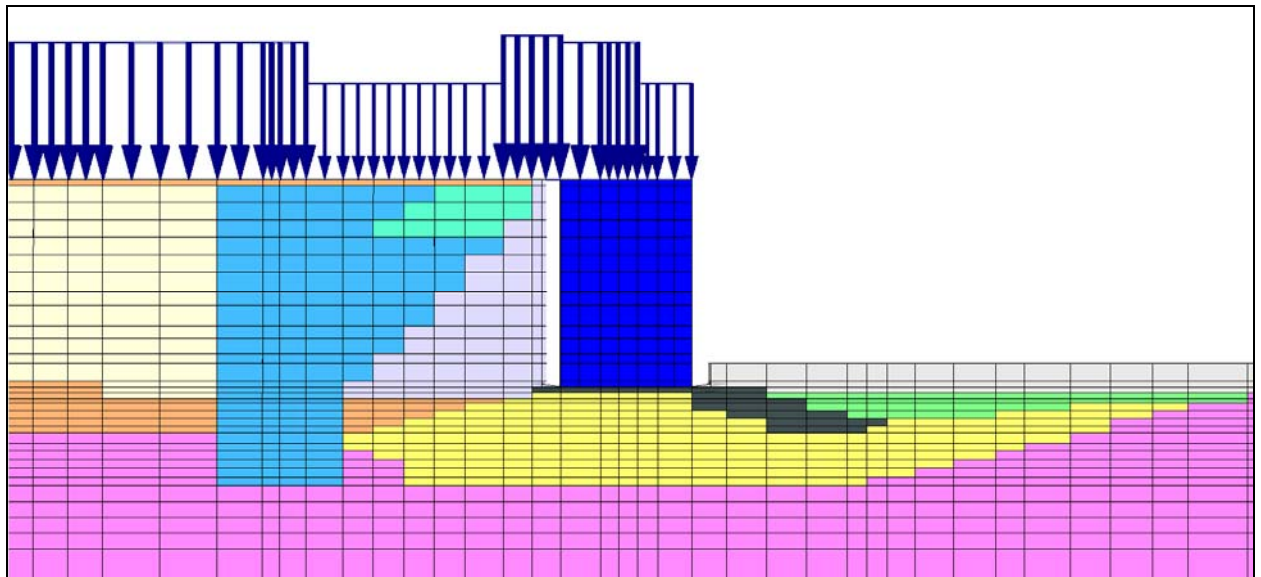


Figura 12. Detalle del área de la malla frontal para el análisis de estabilidad del muelle. Modelo 3D.

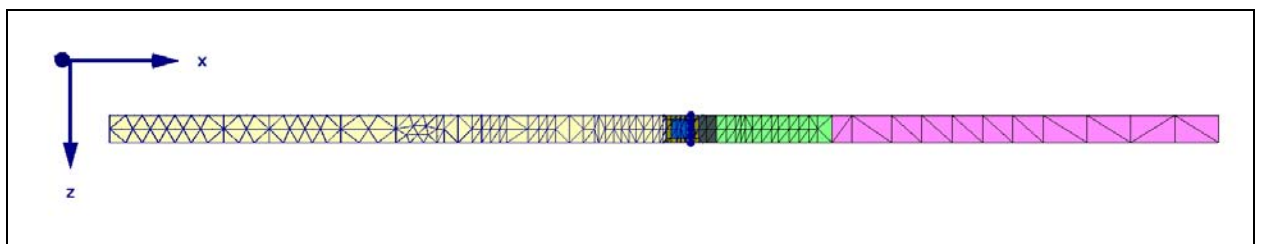


Figura 13. Malla en planta del modelo 3D de 1,0 m de ancho.

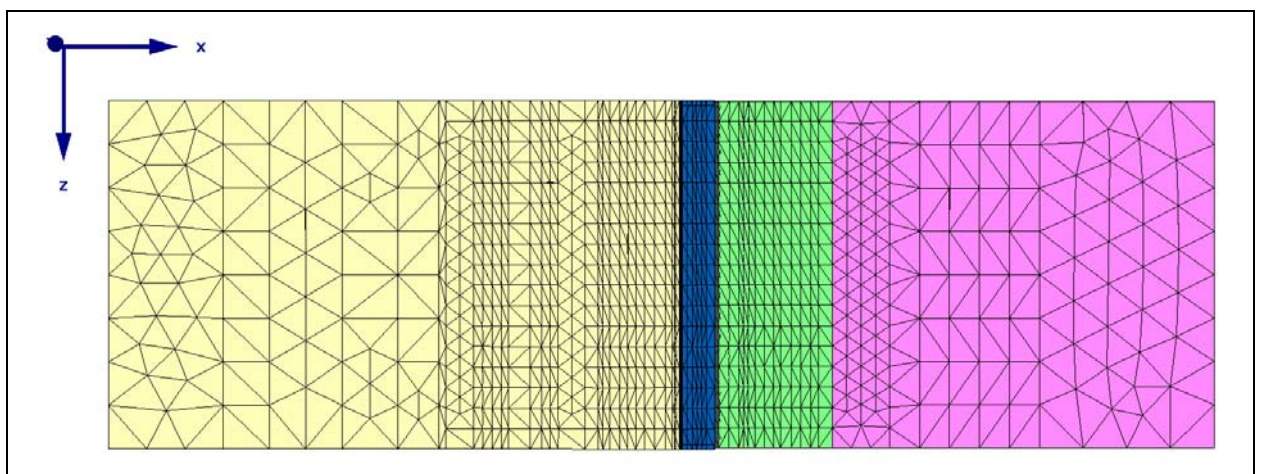


Figura 14. Malla en planta del modelo 3D de 125,0 m de ancho.

En la figura siguiente se muestra una vista global del modelo de 125,0 m de ancho realizado. Se han desactivado las cargas y la malla para facilitar la visibilidad del mismo. En la figura se puede observar que se ha modelizado el cajón como un único bloque.

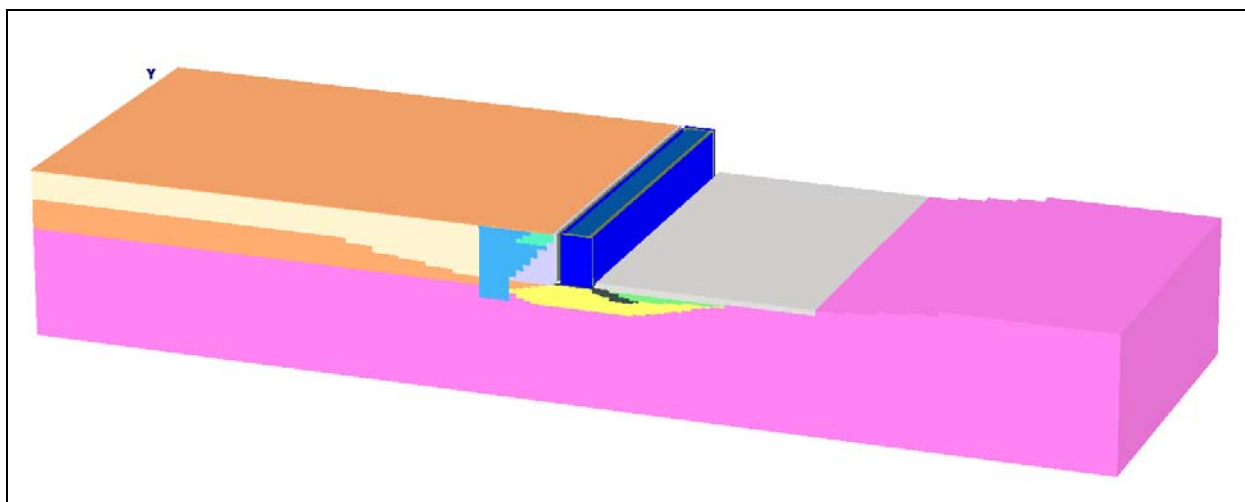


Figura 15. Vista general del modelo de 125,0 m de ancho realizado.

5.3.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

5.3.2.1. ELEMENTOS TIPO "SOIL"

Tal como se ha comentado anteriormente, se han utilizado las mismas propiedades para los elementos tipo "soil" en ambos modelos para asegurar al máximo la bondad de la correlación entre los resultados obtenidos. Aún así, al tratarse de un modelo 3D, para el tipo de suelos a los que se ha asociado un modelo constitutivo Soft Soil Creep, cabe indicar que algunas propiedades también se deberán definir en la dimensión perpendicular a la sección transversal. En la tabla siguiente se muestran las propiedades para este tipo de suelos para el modelo 3D:

UNIDAD	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	k_x (m/d)	k_y (m/d)	k_z (m/d)	λ^* (-)	κ^* (-)	μ^* (-)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Arcilla-limo	16,5	18,5	8,6E-3	8,6E-4	8,6E-3	0,05	0,01	0,001	1,0	20
Relleno dren	18,5	18,5	1,0	1,0	1,0	0,05	0,01	0,04	1,0	20
Relleno hidráulico	17,0	19,0	1,0	1,0	1,0	0,05	0,01	0,04	1,0	20
Relleno 16	16,0	16,0	8,6E-4	8,6E-4	8,6E-4	0,05	0,01	0,04	1,0	20

Tabla 12. Propiedades de los materiales del modelo de Soft Soil Creep para el modelo 3D.

5.3.2.2. ELEMENTOS TIPO "FLOOR"

La solera del cajón se ha modelizado mediante elementos tipo "floor". A continuación se recogen los parámetros adoptados para dichos elementos. Se ha considerado peso propio nulo de la solera porque dicho peso ya se ha tenido en cuenta en el elemento tipo "soil" que rellena el cajón.

ELEMENTO	d (m)	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν (-)
<i>Solera</i>	0,40	0,0	3E+07	0,20

Tabla 13. Parámetros de los elementos tipo "floor".

Cabe indicar que este tipo de elementos no llevan asociada una interfase como los elementos tipo "wall" entre éstos y los elementos tipo "soil".

5.3.2.3. ELEMENTOS TIPO "WALL"

El programa **PLAXIS 3D Foundation v.2.2** no permite la definición de una interfase entre elementos tipo "soil", por lo que se ha optado por utilizar elementos estructurales tipo "wall" (que llevan asociada una interfase), para modelizar las paredes perimetrales del cajón del modelo. A su vez, al unirse los elementos tipo "wall" (paredes perimetrales del cajón) con los elementos tipo "floor" (utilizados para modelizar la solera del cajón), se genera un empotramiento entre ambos, definiéndose de esta forma el recinto como un único bloque rígido que alberga el cajón.

Como en el caso de los elementos tipo "floor", se ha considerado peso propio nulo de éste tipo de elementos porque dicho peso ya se ha tenido en cuenta en el elemento tipo "soil" que rellena el cajón. Los parámetros adoptados para los elementos tipo wall se resumen en la tabla siguiente:

ELEMENTO	d (m)	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν (-)
<i>Pared perimetral del cajón</i>	0,30	0	3E+07	0,20

Tabla 14. Parámetros de los elementos tipo "wall".

En la figura siguiente se muestra la combinación de elementos tipo "wall" y tipo "floor" utilizada para configurar el recinto rígido que constituye el cajón de hormigón.

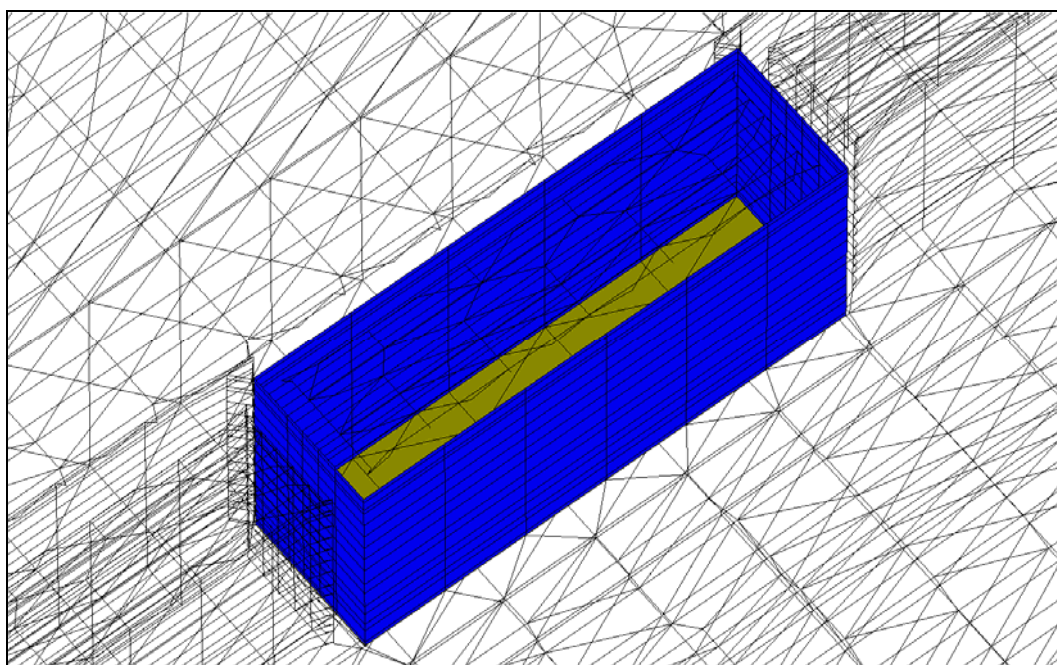


Figura 16. Configuración del cajón mediante elementos tipo "wall" y tipo "floor".

5.3.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Se han utilizado condiciones de contorno del tipo: (1) desplazamientos horizontales impedidos en los contornos perimetrales del modelo ($u_x = u_z = 0$); (2) desplazamientos verticales y horizontales impedidos en el contorno inferior ($u_x = u_z = u_y = 0$) y (3) desplazamientos totales libres en la superficie del terreno. No se han impuesto condiciones de contorno de tipo hidráulicas.

5.3.4 CONDICIONES INICIALES

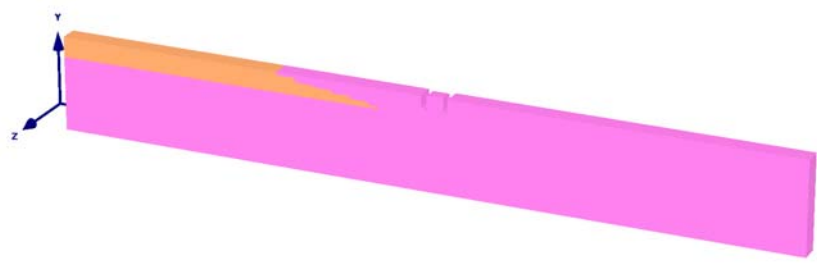
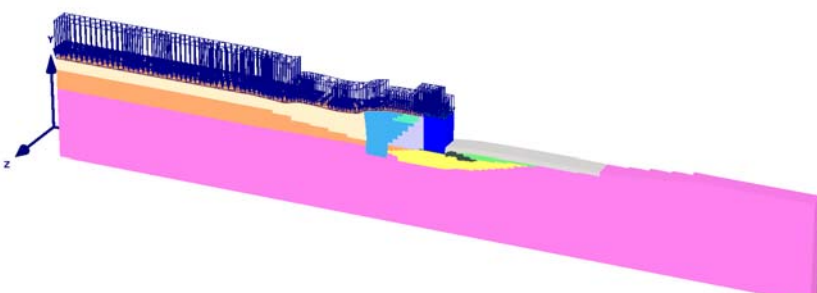
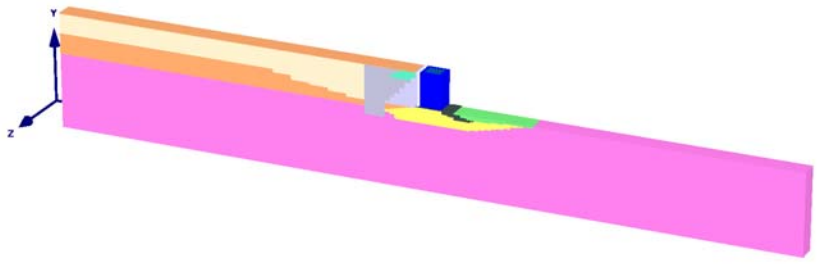
Las condiciones iniciales son las mismas que las consideradas en el modelo 2D.

5.3.5 HIPÓTESIS DE CARGA

Las hipótesis de carga para los modelos 3D son las mismas que las consideradas en el modelo 2D.

5.3.6 FASES DEL ANÁLISIS

Se ha modelizado el proceso de construcción del muelle considerando las mismas fases que se han considerado en la modelización 2D, mostradas en la tabla siguiente.

FASES DE LA MODELIZACIÓN PLAXIS 3D Foundation v2.2	DESCRIPCIÓN
	<p>Fase 0. Tensiones iniciales</p>
	<p>Fase 1. Construcción y trasdosado del muelle de cajones hasta la cota +2,0. (Se ha considerado proceso drenado).</p> <p>Las sobrecargas representan la sobrecarga debida a las precargas terrestres sobre el muelle y en su trasdós.</p>
	<p>Fase 2. Dragado lado mar del muelle y retirada de las precargas terrestres. Las columnas de grava han mejorado sus propiedades resistentes. (Se ha considerado proceso drenado).</p>

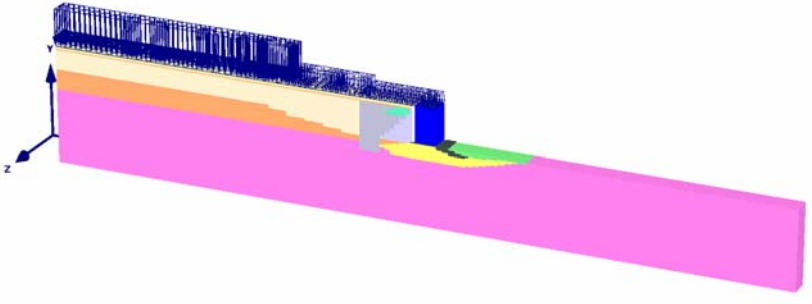
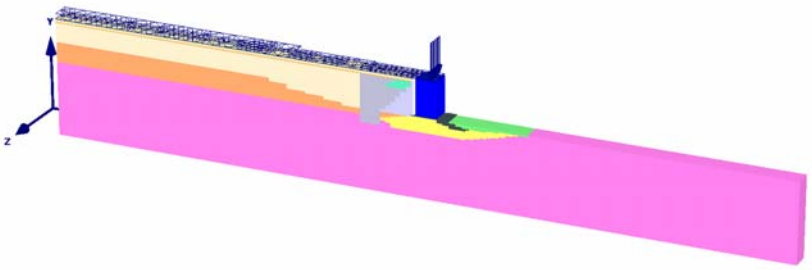
FASES DE LA MODELIZACIÓN PLAXIS 3D Foundation v2.2	DESCRIPCIÓN
	<p>Fase 3. Puesta en servicio de la estructura. Sobrecargas de tráfico y equipos y estacionamiento y almancenamiento. (Se ha considerado proceso no drenado).</p>
	<p>Fase 4. Fase servicio de la estructura. Acción de la grúa sobre el muelle. . (Se ha considerado proceso no drenado).</p>

Tabla 15. Fases de la modelización en el análisis 2D.

5.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los cálculos efectuados se procede en el presente apartado al análisis y comparación de los modelos realizados. La comparación se realiza a partir de los resultados de las tres modelizaciones para diferentes variables tanto en tensiones (tensiones efectivas, presiones de poro...) como en desplazamientos.

Para el control de la evolución tanto de desplazamientos como de tensiones se han tomado unos puntos de control. En la figura y tabla siguientes se muestran los puntos de control tomados.

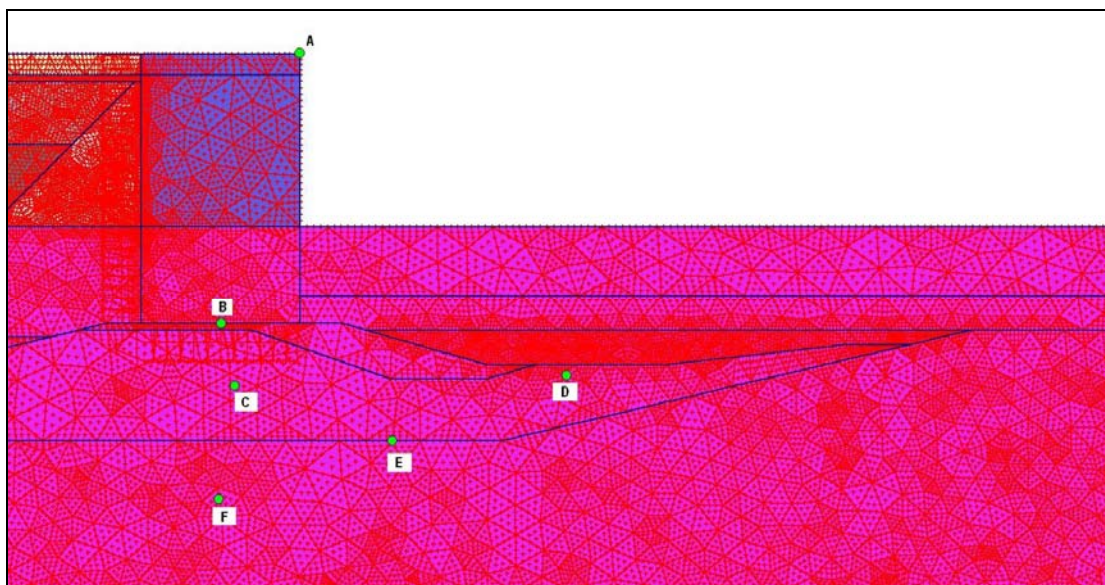


Figura 17. Puntos de control tomados para la comparación de los modelos realizados.

PUNTO	COORDENADAS	
	X	Y
A	11,5	3,5
B	5,75	-16,0
C	7,0	-21,0
D	31,0	-20,0
E	18,2	-24,5
F	5,70	-29,0

Tabla 16. Coordenadas de los puntos de control.

5.4.1 COMPARACIÓN EN DESPLAZAMIENTOS

A continuación se adjuntan los resultados en desplazamientos proporcionados por los tres modelos realizados. Para los modelos 3D los resultados corresponden a la sección intermedia de dichos modelos ($z = 5,0$ para el modelo de 10,0 m de ancho y $z = 62,5$ para el modelo de 125,0 m de ancho).

Los resultados que se muestran a continuación responden a los desplazamientos del muelle y del terreno en la fase de servicio (con sobrecargas de tráfico y equipos, estacionamiento y almacenamiento y la grúa).

Las Figura 18, Figura 19 y Figura 20 responden a los desplazamientos totales en las fases consideradas de servicio (aplicación de las sobrecargas de tráfico, operaciones y almacenamiento y la carga de la grúa aplicada), realizadas como un cálculo no drenado.

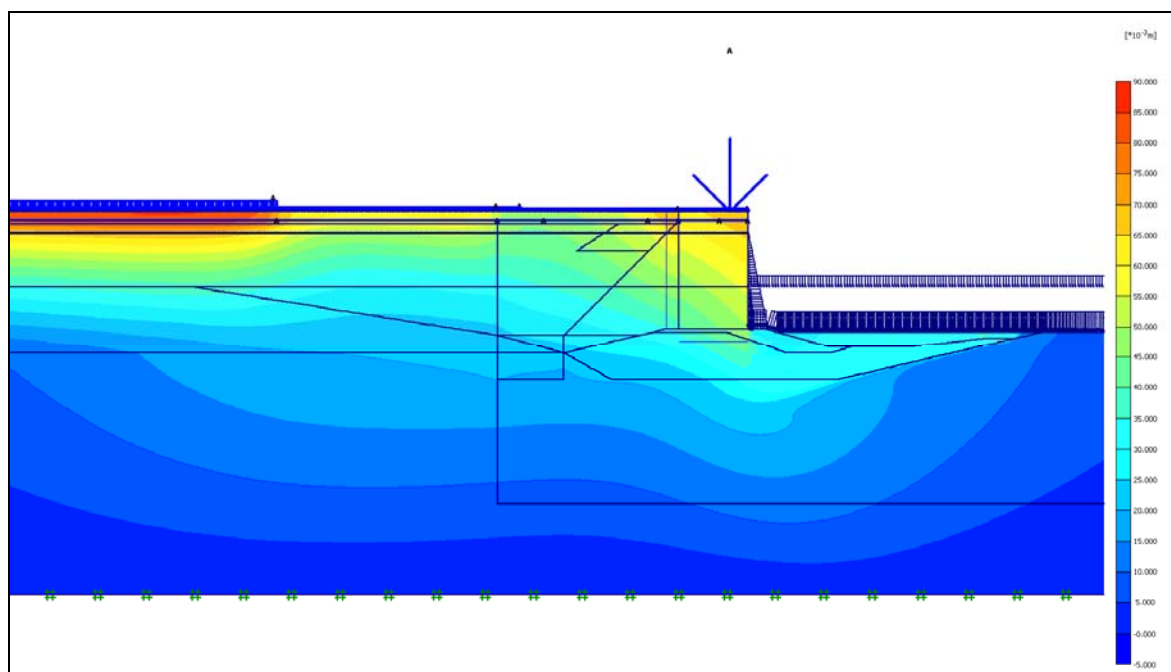


Figura 18. Desplazamientos totales en fase de servicio. Modelo 2D.

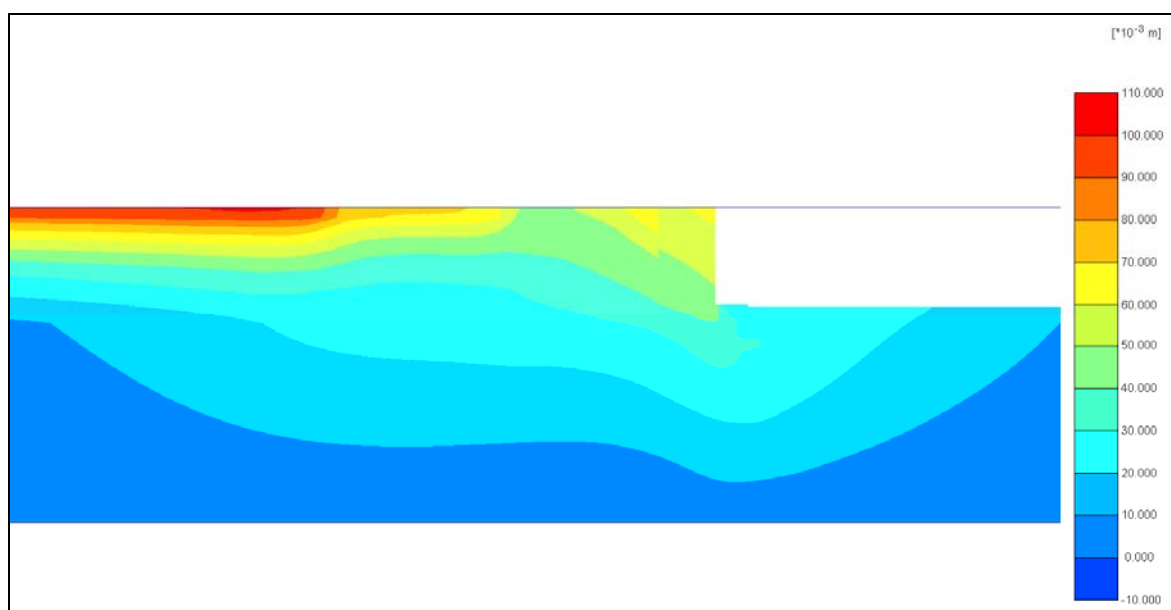


Figura 19. Desplazamientos totales en fase de servicio. Modelo 3D (10,0 m de ancho).

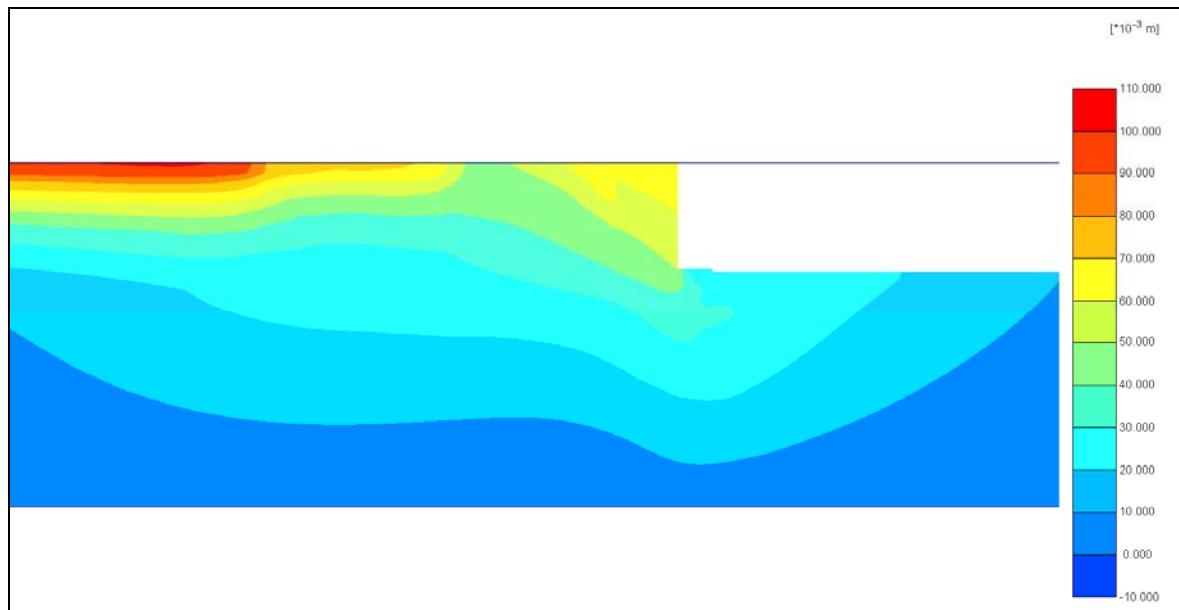


Figura 20. Desplazamientos totales en fase de servicio. Modelo 3D (125,0 m de ancho).

Las Figura 21, Figura 22 y Figura 23 responden a los desplazamientos horizontales (u_x) en las fases no drenadas.

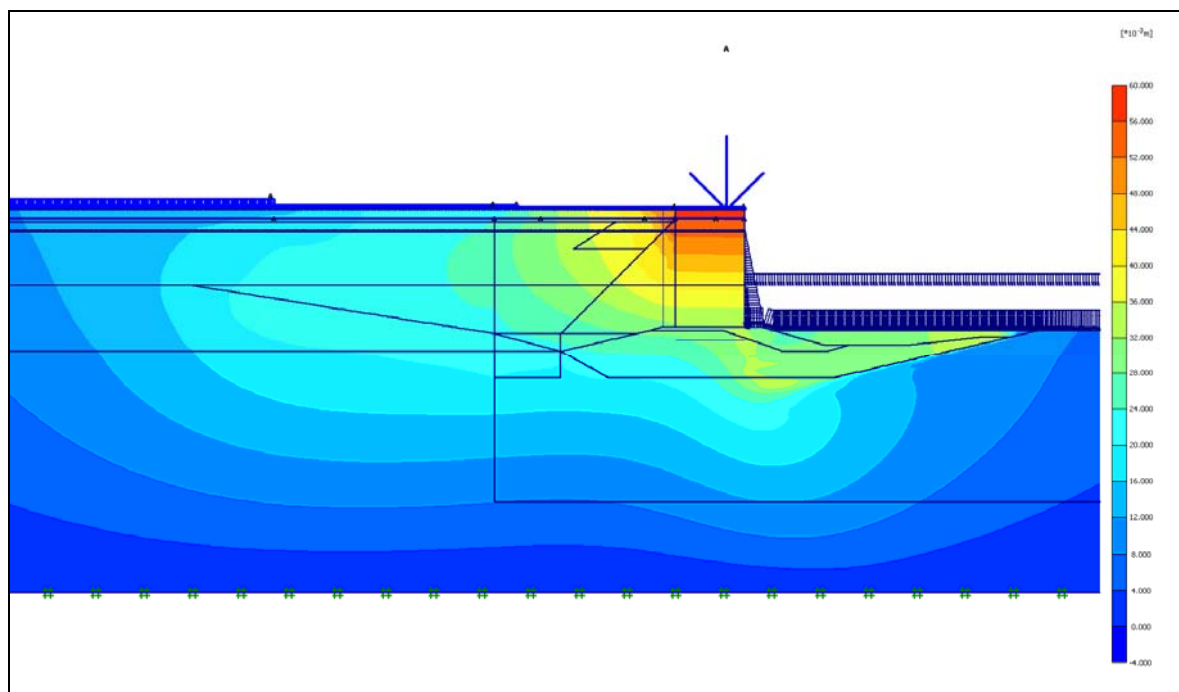


Figura 21. Desplazamientos horizontales en fase de servicio. Modelo 2D.

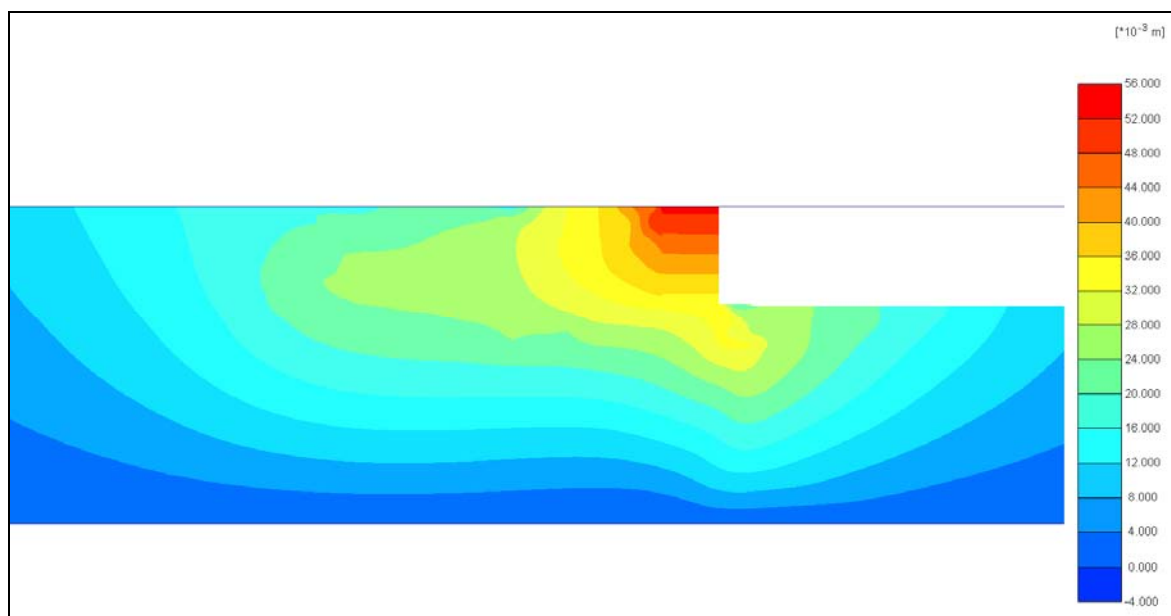


Figura 22. Desplazamientos horizontales en fase de servicio. Modelo 3D (10,0 m de ancho).

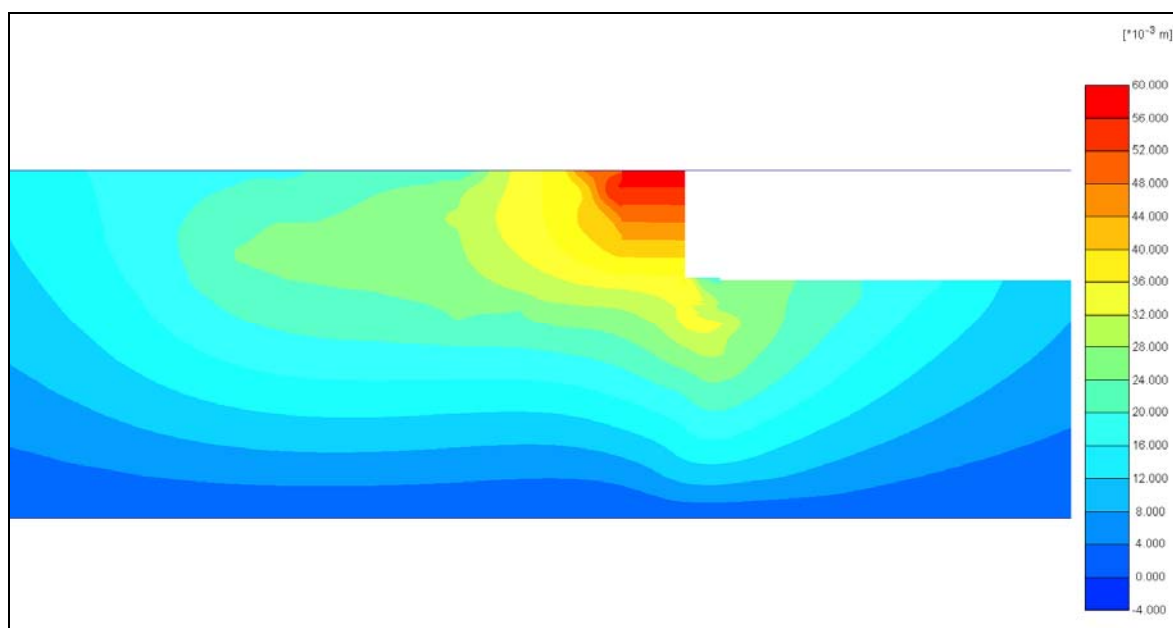


Figura 23. Desplazamientos horizontales en fase de servicio. Modelo 3D (125,0 m de ancho).

A continuación, en las tres figuras siguientes se muestran los asientos sufridos tanto por el terreno como para el cajón en las fases correspondientes al cálculo no drenado. De dichas figuras se analizará la evolución de los asientos en tres de los puntos de los puntos de control antes mencionados (puntos B, C y D) para los 3 modelos realizados.

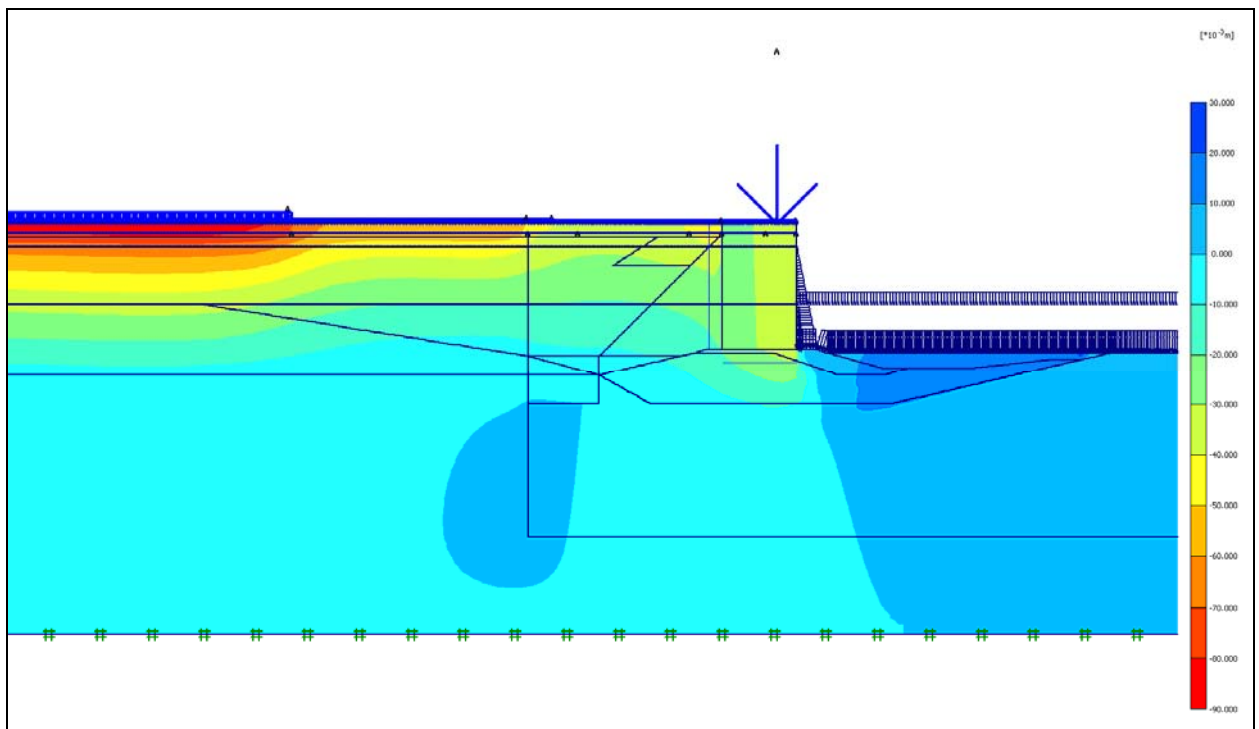


Figura 24. Desplazamientos verticales en fase de servicio. Modelo 2D.

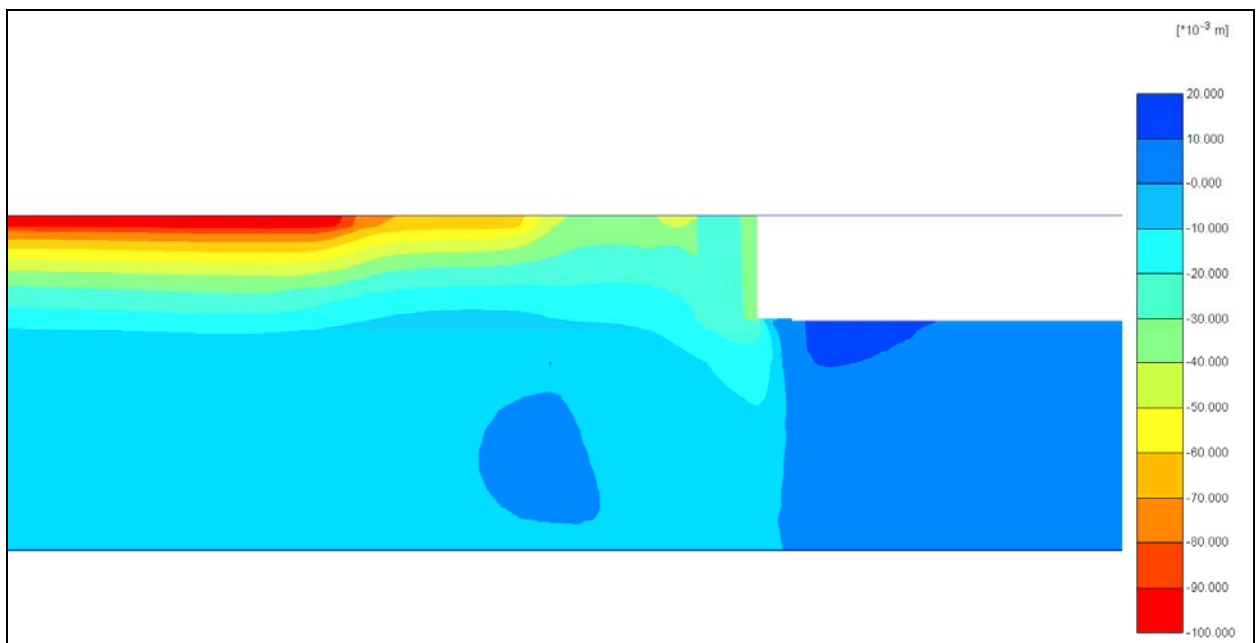


Figura 25. Desplazamientos verticales en fase de servicio. Modelo 3D (10,0 m de ancho).

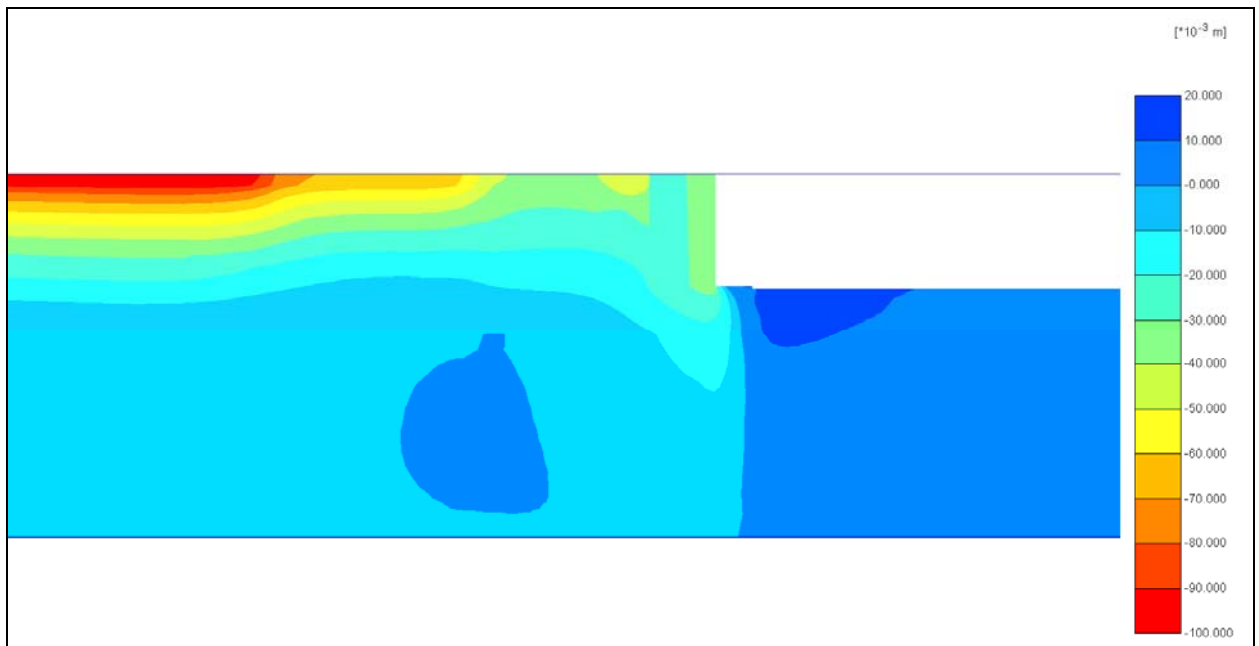


Figura 26. Desplazamientos verticales en fase de servicio. Modelo 3D (125,0 m de ancho).

Tal como se ha comentado anteriormente, se han comparado tanto la evolución como el resultado final obtenido en cuanto a asientos se refiere para los puntos de control B, C y D y para los 3 modelos realizados. Se adjuntan a continuación los gráficos obtenidos.

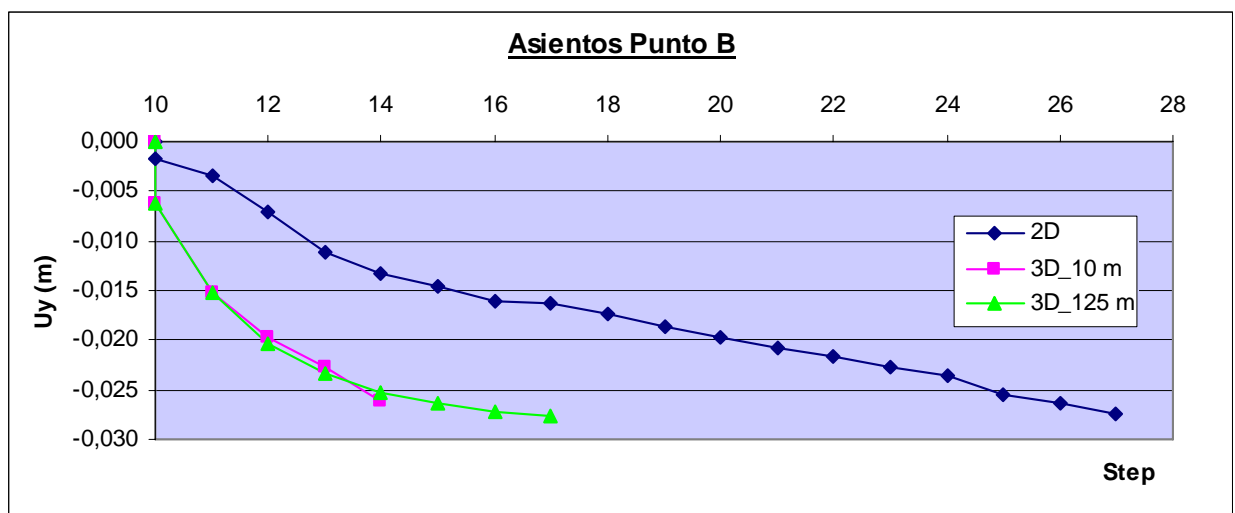


Gráfico 1. Evolución de asientos en punto B obtenidos para los 3 modelos en las fases de servicio (no drenadas).

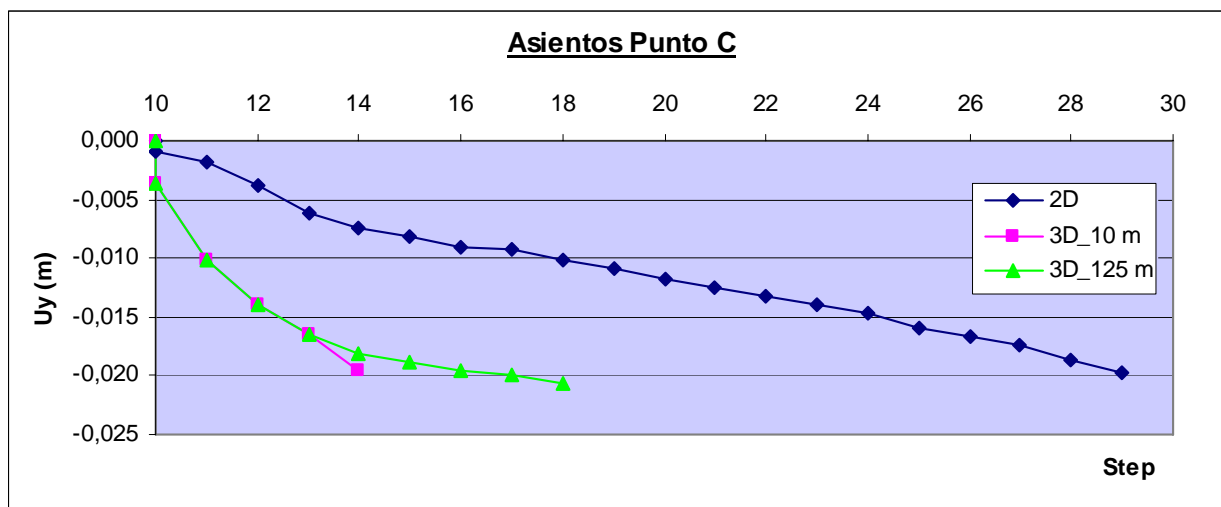


Gráfico 2. Evolución de asientos en punto C obtenidos para los 3 modelos en las fases de servicio (no drenadas).

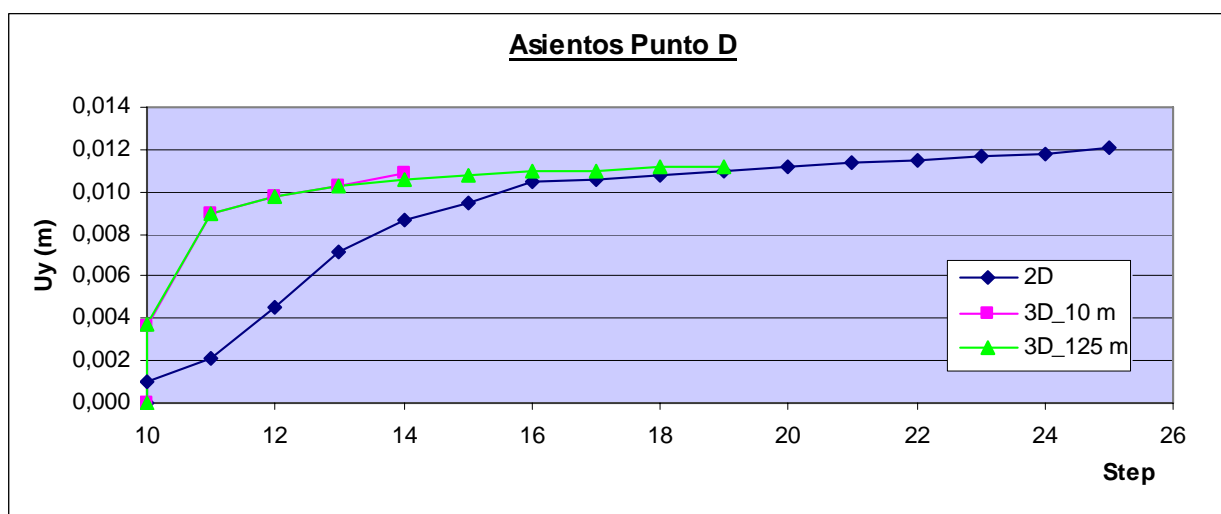


Gráfico 3. Evolución de asientos en punto D obtenidos para los 3 modelos en las fases de servicio (no drenadas).

De los gráficos obtenidos se observa que tanto el modelo 3D (10,0 m de ancho) como el modelo 3D (125,0 m de ancho) siguen prácticamente evoluciones paralelas, en este caso, en cuanto a asientos en función de los pasos de cálculo. A pesar que el modelo 2D (125,0 m de ancho) difiere un poco de la evolución seguida por los otros dos modelos, se observa que el resultado final obtenido difiere muy poco de los obtenidos mediante los modelos 3D (10,0 m de ancho) y 3D (125,0 m de ancho).

En la tabla siguiente se resumen los asentos al final del cálculo no drenado para los 3 modelos realizados y para los 3 puntos de control analizados.

Modelo	Puntos de control de asentos		
	Punto B	Punto C	Punto D
Modelo 2D	2,73 cm	1,98 cm	1,20 cm
Modelo 3D (10,0 m de ancho)	2,62 cm	1,95 cm	1,09 cm
Modelo 3D (125,0 m de ancho)	2,76 cm	2,06 cm	1,12 cm

Tabla 17. Asientos al final del cálculo no drenado (fase servicio) para los 3 modelos realizados.

En la figura siguiente se muestra la malla deformada tras el cálculo de las fases no drenadas (fases de servicio de la estructura) para el modelo 3D (125,0 m ancho). Se han desactivado las cargas aplicadas (sobrecargas de almacenamiento, tráfico y operaciones y la carga de la grúa) y la representación del nivel freático para poder observar las deformaciones en el terreno.

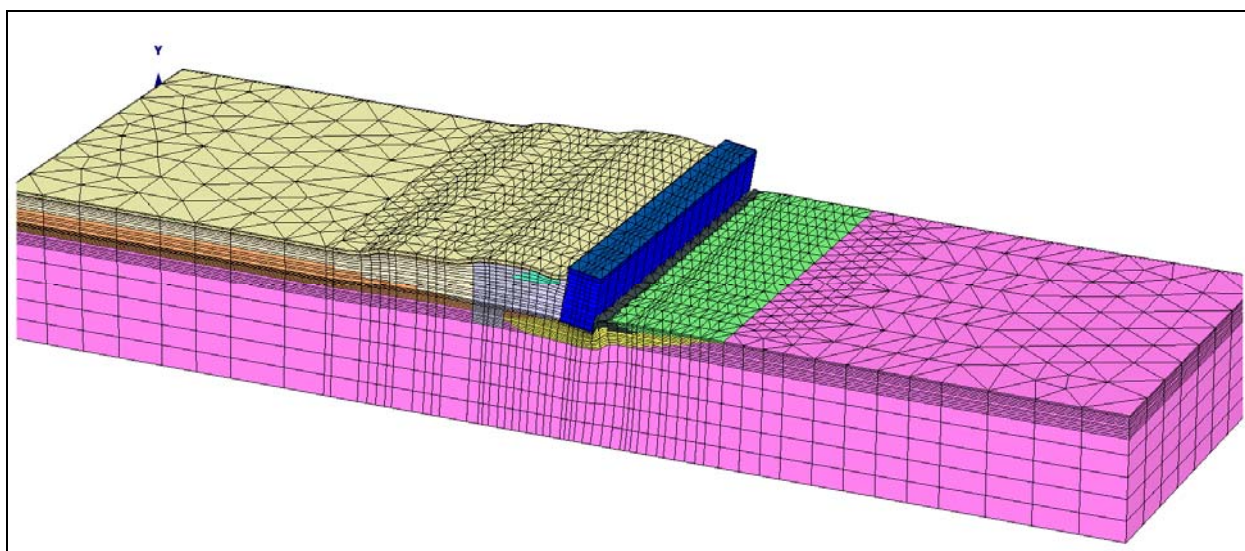


Figura 27. Malla deformada tras fase de servicio. Modelo 3D (125,0 m ancho).

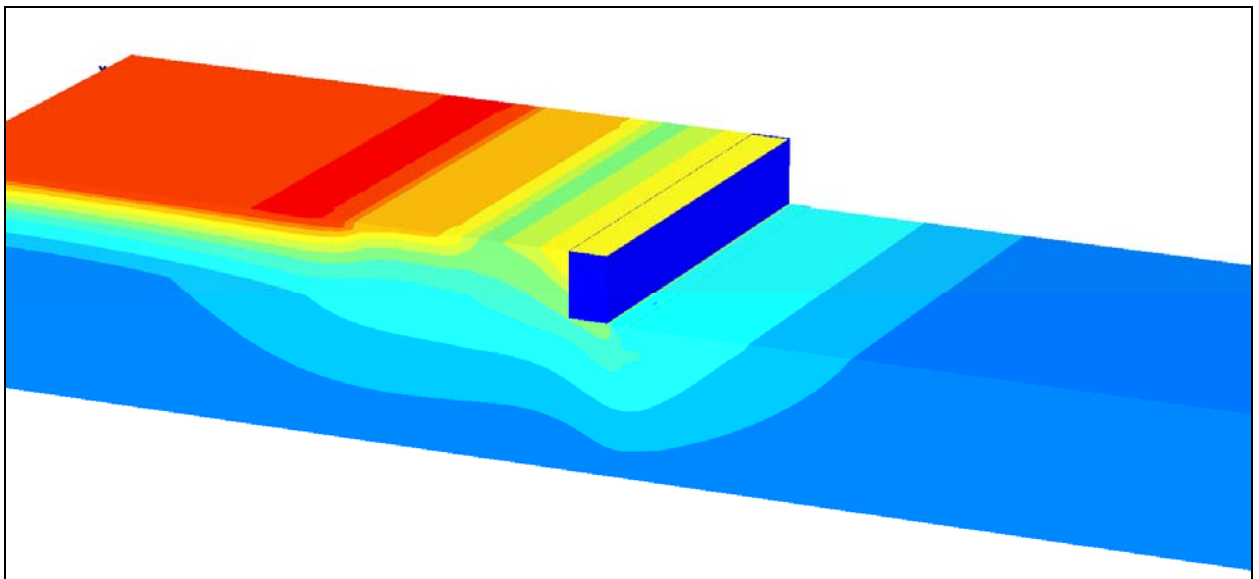


Figura 28. Deformaciones totales tras fase de servicio. Modelo 3D (125,0 m ancho).

5.4.2 COMPARACIÓN EN TENSIONES

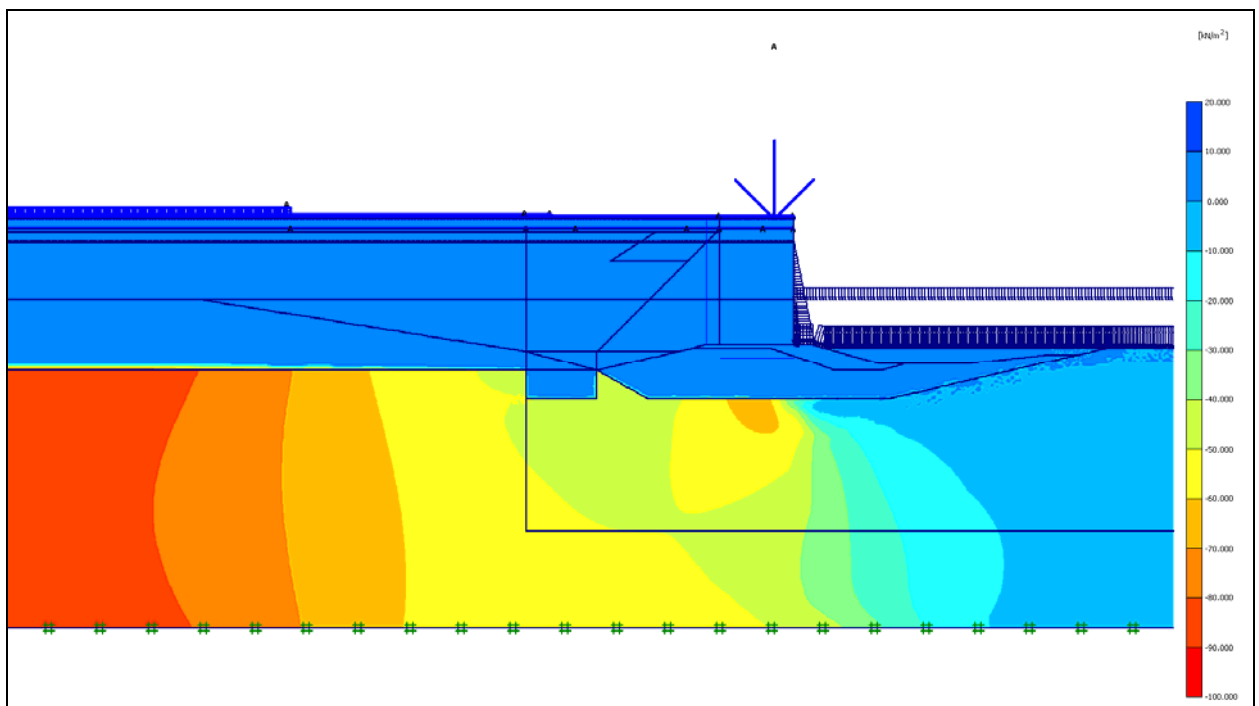


Figura 29. Presión de poro generada (EPP) en fase de servicio. Modelo 2D.

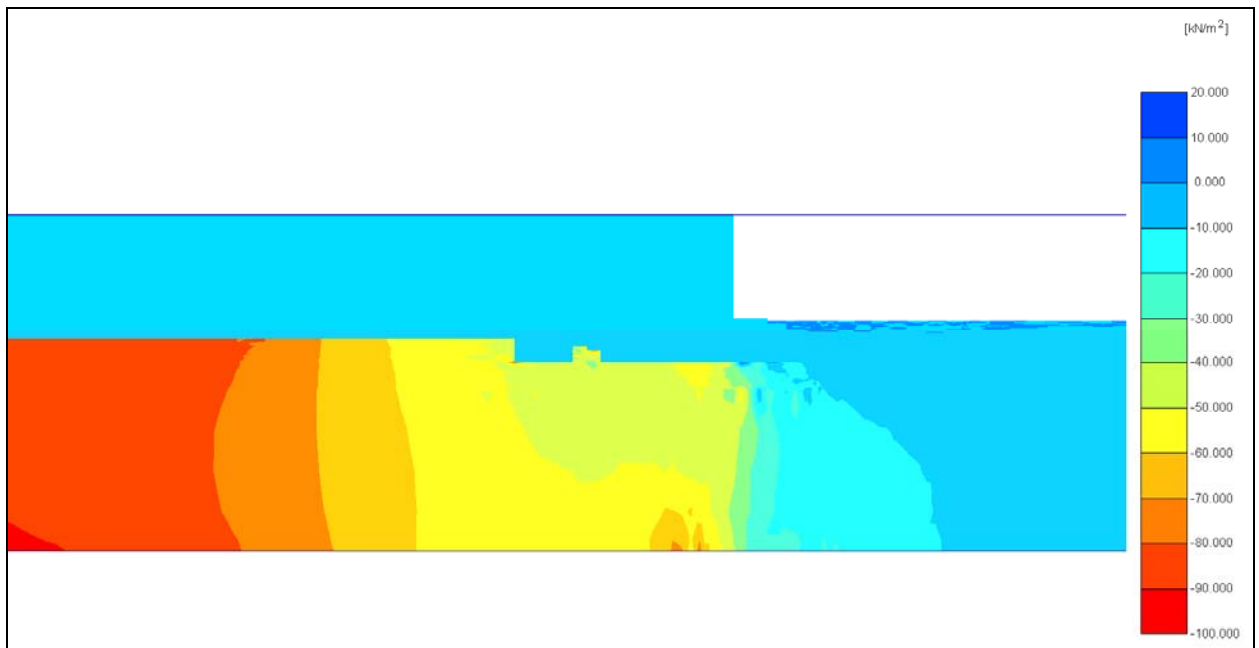


Figura 30. Presión de poro generada (EPP) en fase de servicio. Modelo 3D (10,0 m de ancho).

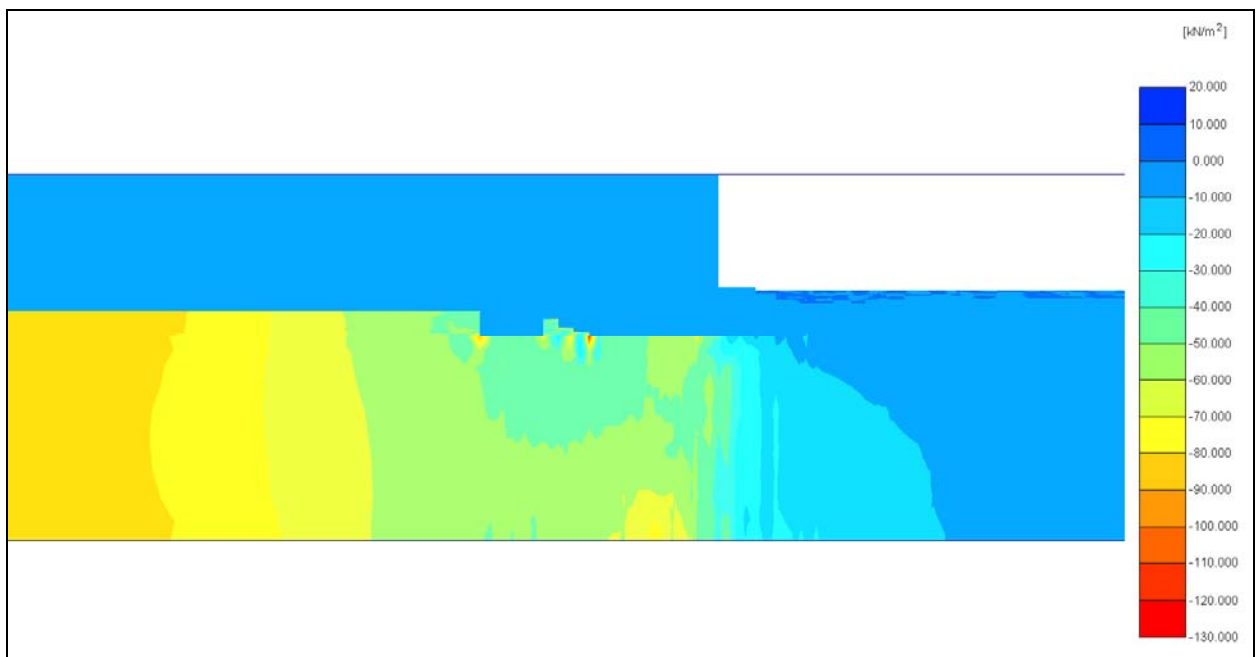


Figura 31. Presión de poro generada (EPP) en fase de servicio. Modelo 3D (125,0 m de ancho).

En el gráfico siguiente se muestra la evolución del exceso de presión de poro generada en las fases no drenadas (tras la aplicación de las sobrecargas de operaciones, tráfico y almacenamiento) y la carga de la grúa. Cabe destacar que los resultados obtenidos de los 3 modelos realizados son prácticamente los mismos al final del cálculo.

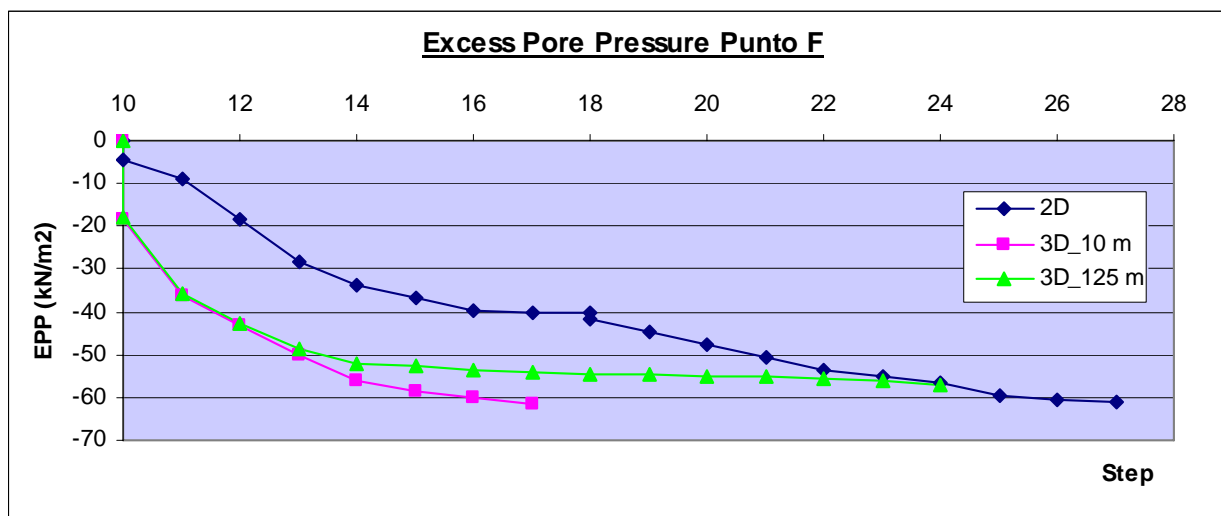


Gráfico 4. Evolución de asientos en punto D obtenidos para los 3 modelos en las fases de servicio (no drenadas).

Se adjunta a continuación una tabla con los excesos de presión de poro obtenidos al final del cálculo no drenado para los 3 modelos realizados.

Modelo	Punto de control de EPP
	Punto F
Modelo 2D	56,3 kN/m ²
Modelo 3D (10,0 m de ancho)	56,0 kN/m ²
Modelo 3D (125,0 m de ancho)	53,2 kN/m ²

Tabla 18. Excesos de presión de poro al final del cálculo no drenado (fase servicio) para los 3 modelos.

En la Figura 32, Figura 33 y Figura 34 se pueden observar los puntos de plastificación tras las fases anteriormente mencionadas.

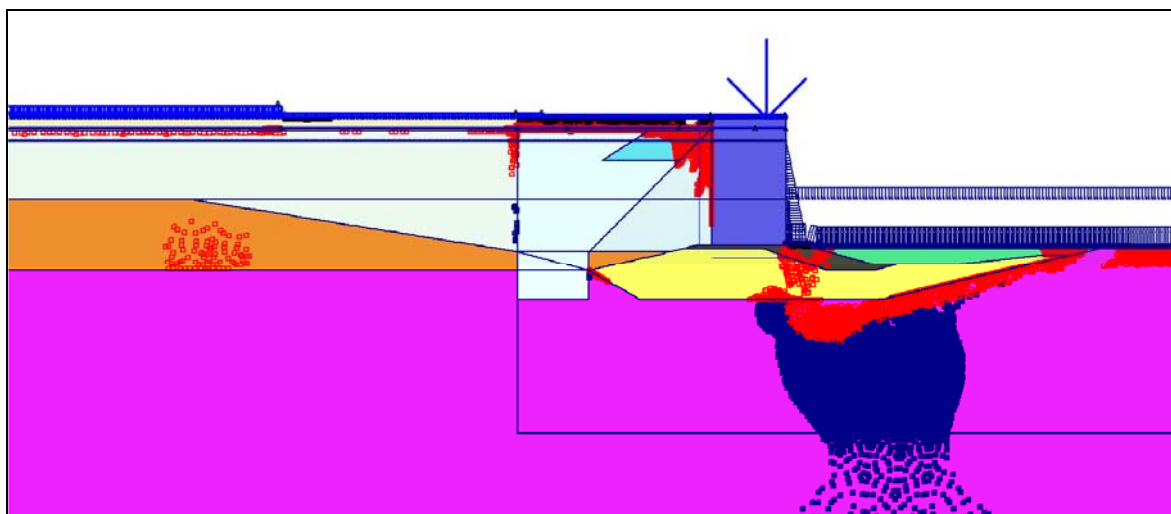


Figura 32. Puntos de plastificación del terreno. Modelo 2D.

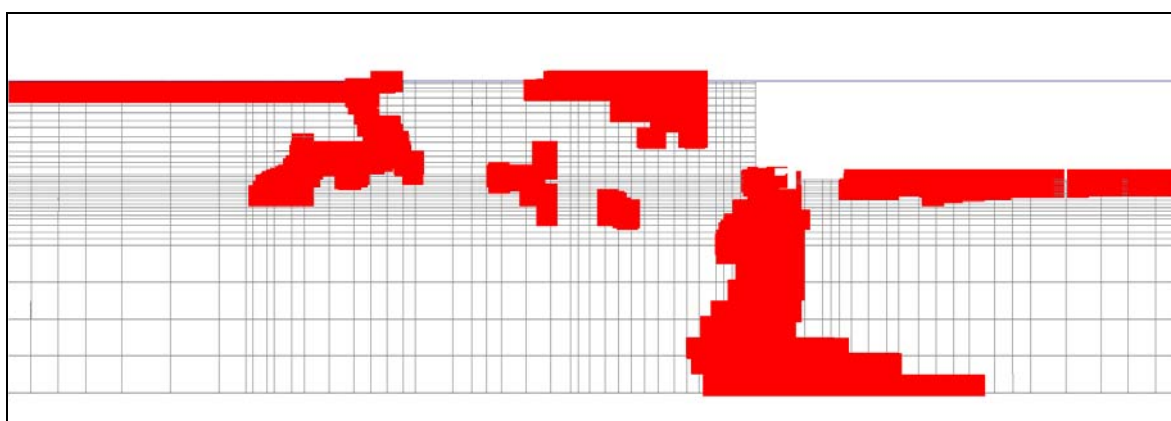


Figura 33. Puntos de plastificación del terreno. Modelo 3D (10,0 m de ancho).

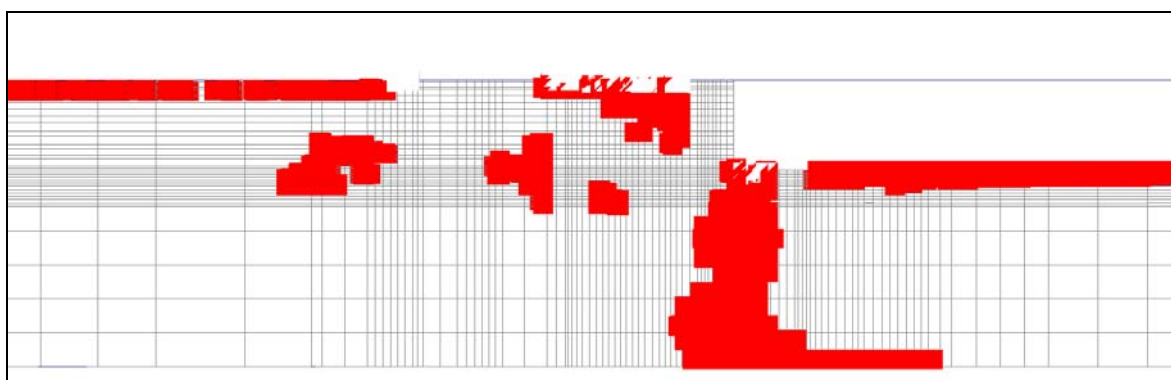


Figura 34. Puntos de plastificación del terreno. Modelo 3D (125,0 m de ancho).

De las figuras correspondientes a los puntos de plastificación del terreno tras las fases analizadas se extrae que los resultados obtenidos para los 3 modelos realizados son prácticamente los mismos.

5.5 ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD

En el presente apartado se lleva a cabo el análisis del Factor de Seguridad, en adelante FS, obtenido para los tres modelos realizados. Teniendo en cuenta el objeto del presente documento, consistente en estudiar el efecto tridimensional de las cargas en un muelle de cajones verticales de hormigón, se considera especialmente importante la evaluación del FS obtenido en los modelos realizados para la calibración de caras a evaluar, en una fase posterior, la fiabilidad de los resultados en base a los FS obtenidos en el estudio del efecto tridimensional.

Tal como se ha comentado anteriormente, el un proceso de construcción por etapas, el procedimiento de cálculo de PLAXIS consiste en el nivel último de avance de la carga. Una propiedad importante de éste procedimiento de cálculo es que se pueden especificar el estado o los valores de la carga total que ha de ser aplicada.

Por otro lado, durante el cálculo de construcción por etapas, un multiplicador que controla el proceso de la construcción por etapas (ΣM_{stage}) se incrementa desde cero y se espera que alcance el nivel último de 1,0 al final de la fase de cálculo.

Para la obtención del FS de los tres modelos realizados se ha procedido a la mayoración de la carga de la grúa con objeto de obtener la carga última de grúa que el terreno es capaz de soportar en el momento de su fallo. Dicho proceso se ha valido del multiplicador que controla el procedimiento de construcción por etapas ΣM_{stage} .

El proceso ha consistido en colocar sobre el muelle en una sola fase de construcción una carga de grúa mucho mayor a la que se prevé que éste pueda soportar y evaluar el valor del multiplicador ΣM_{stage} en el momento de fallo del terreno. Al tratarse de un multiplicador que va desde 0 hasta 1 y al aplicar en una única fase la carga de la grúa, el valor que alcance el ΣM_{stage} en dicha fase será el porcentaje del valor de la carga que podrá soportar el terreno.

En base a eso, se ha procedido a colocar sobre el cajón de los 3 modelos realizados una carga de grúa de 3000 kN/m y observar qué valor alcanza el multiplicador ΣM_{stage} .

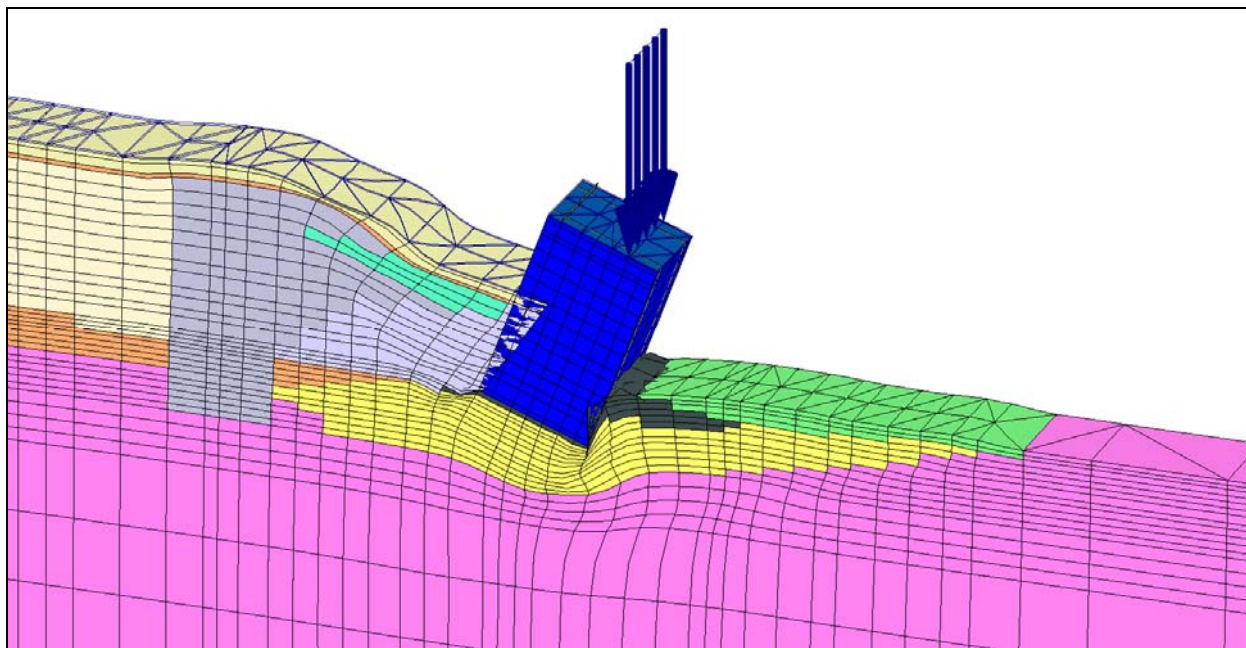


Figura 35. Malla deformada tras la aplicación de la carga mayorada de la grúa. Modelo 3D (10,0 m de ancho).

Para la carga anteriormente mencionada aplicada sobre el cajón (3000 kN/m), se resumen en la tabla siguiente los valores del multiplicador ΣM_{stage} alcanzados:

Modelo	ΣM_{stage} alcanzado
Modelo 2D	0,553
Modelo 3D (10,0 m de ancho)	0,545
Modelo 3D (125,0 m de ancho)	0,577

Tabla 19. Valores del multiplicador ΣM_{stage} alcanzados para los modelos realizados.

Por lo tanto, considerando que el valor alcanzado de ΣM_{stage} equivale al porcentaje de la carga aplicada que es capaz de soportar el terreno, las cargas últimas soportadas por el terreno se muestran en la tabla siguiente:

Modelo	Carga última alcanzada
Modelo 2D	1.659 kN/m
Modelo 3D (10,0 m de ancho)	1.635 kN/m
Modelo 3D (125,0 m de ancho)	1.731 kN/m

Tabla 20. Valores de la carga última alcanzada para los modelos realizados en el momento del fallo del terreno.

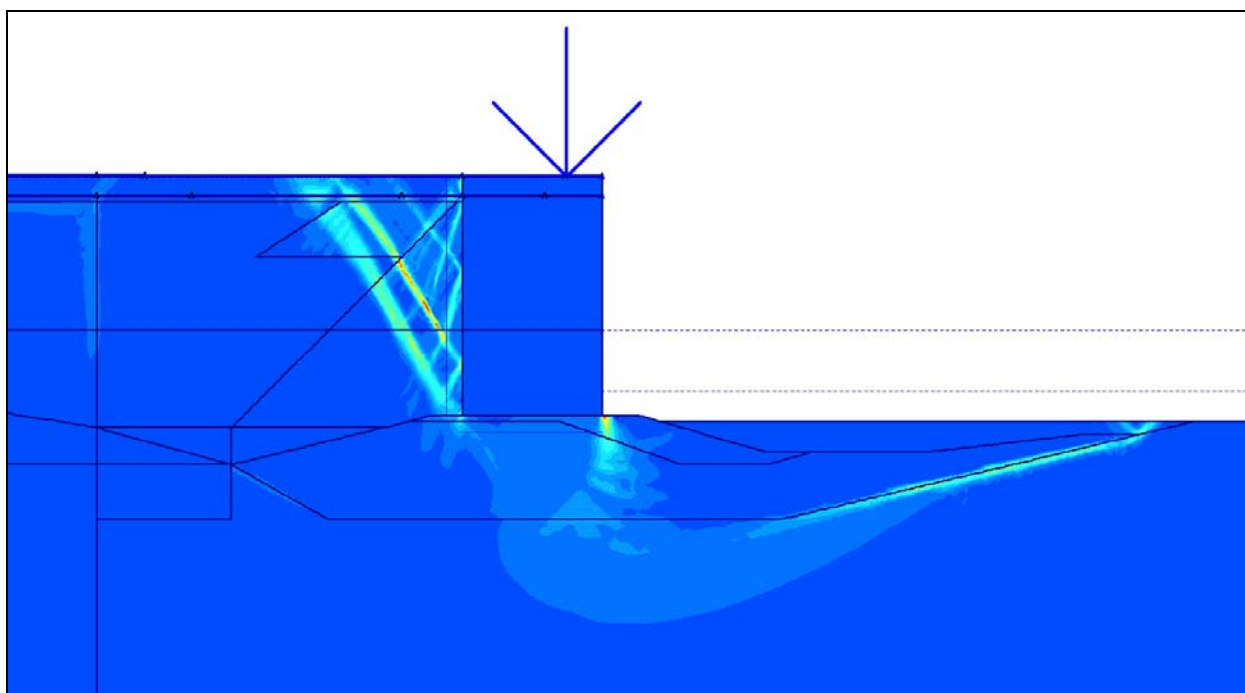


Figura 36. Deformaciones de corte en el terreno debidas a la aplicación de la carga de la grúa. Modelo 2D.

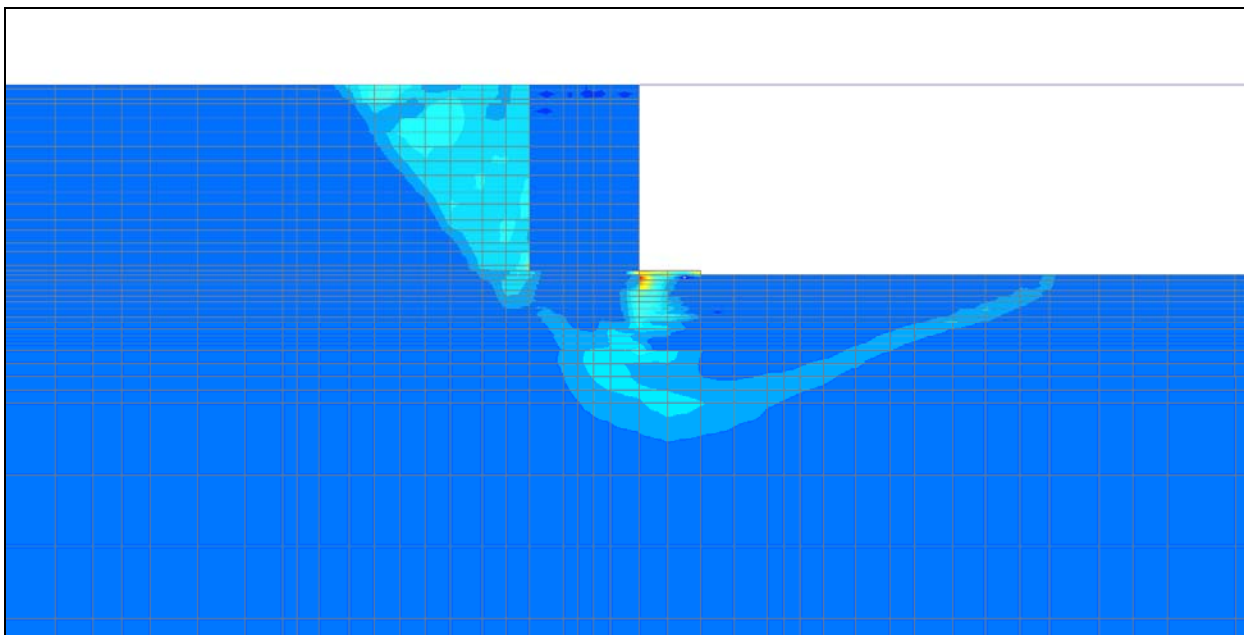


Figura 37. Deformaciones de corte en el terreno debidas a la aplicación de la carga de la grúa. Modelo 3D (10,0 m).

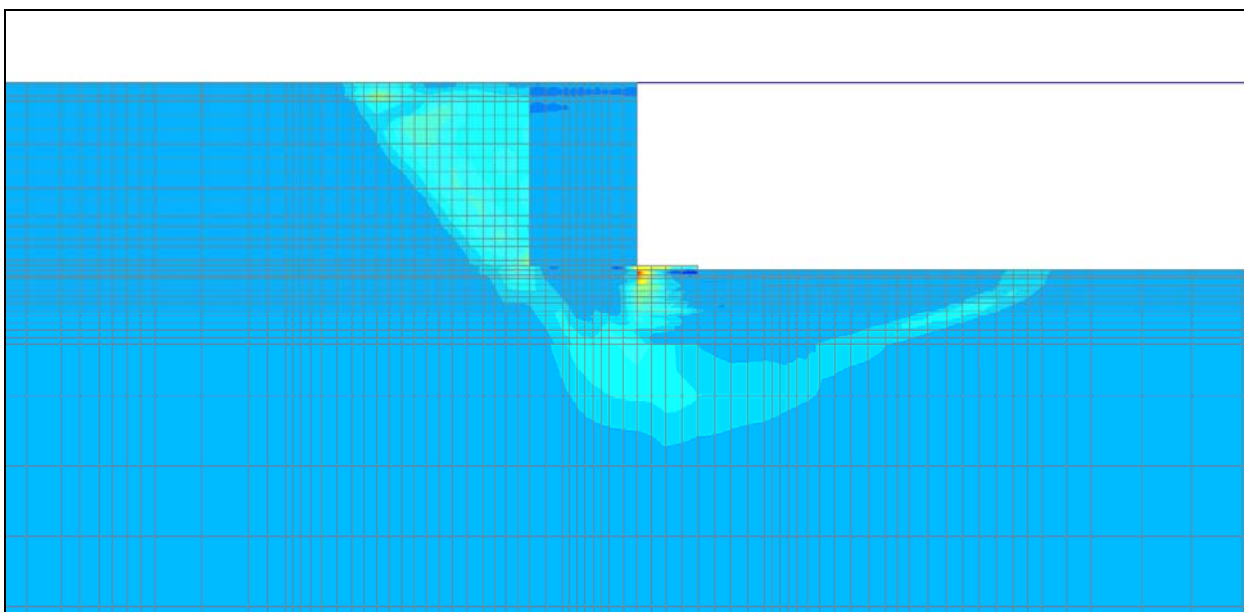


Figura 38. Deformaciones de corte en el terreno debidas a la aplicación de la carga de la grúa. Modelo 3D (125 m).

De las figuras de deformaciones de corte puede observarse que la carga máxima de grúa admitida por el terreno viene determinada por la acumulación de tensiones que se genera al pie del cajón.

Considerando que el FS equivale a la carga última que soportará la estructura dividido por la carga aplicada (en este caso se considera una carga aplicada de 350 kN/m), los FS obtenidos para los 3 modelos realizados para la calibración se muestran en la Tabla 21.

Modelo	FS obtenido
Modelo 2D	4,74
Modelo 3D (10,0 m de ancho)	4,67
Modelo 3D (125,0 m de ancho)	4,94

Tabla 21. FS obtenidos para los modelos realizados en el momento del fallo del terreno.

Se observa de los cálculos que los FS obtenidos de los modelos realizados para la calibración son muy similares para los tres modelos, obteniendo una dispersión del 5,5% entre los valores extremos de FS obtenidos.

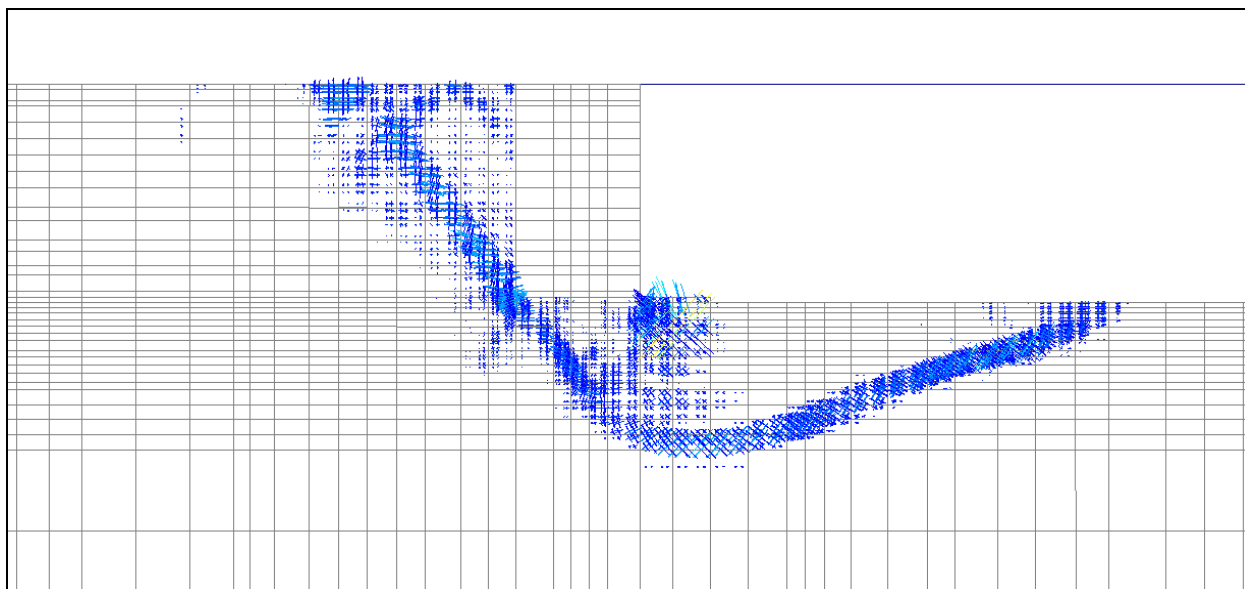
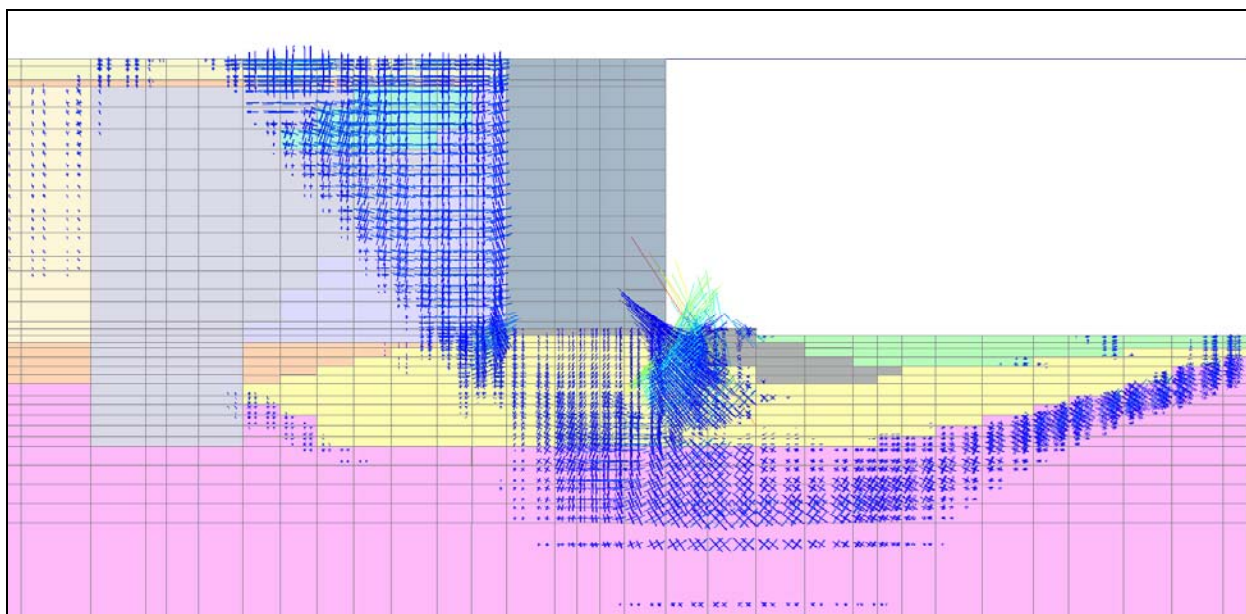


Figura 39. Direcciones principales incrementales de deformaciones.



En las figuras siguientes se muestran las deformaciones de corte incrementales para la fase considerada.

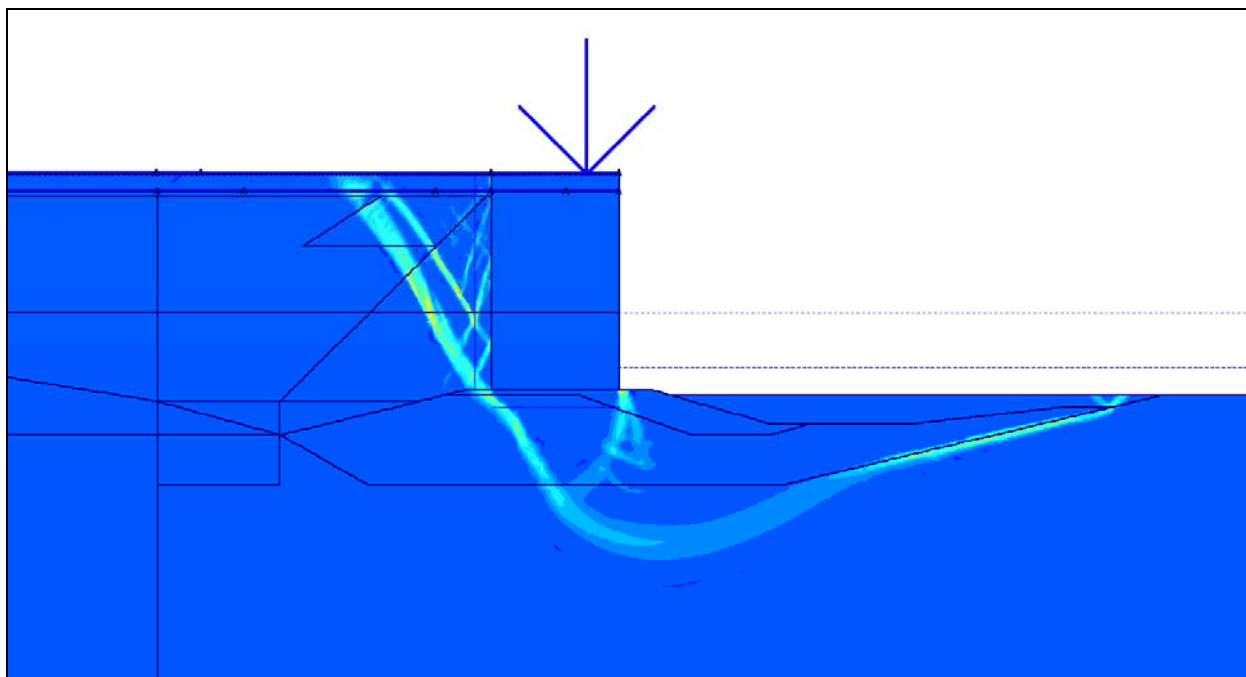


Figura 40. Deformaciones de corte en el terreno debidas a la aplicación de la carga de la grúa. Modelo 2D.

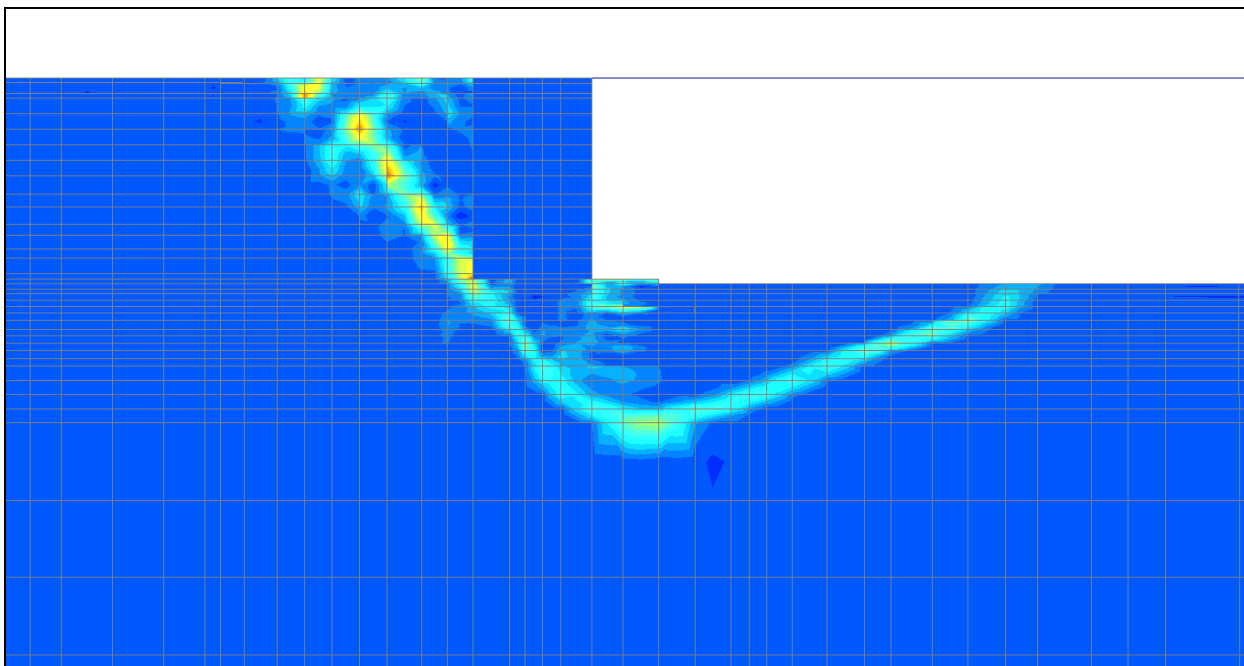


Figura 41. Deformaciones de corte en el terreno debidas a la aplicación de la carga de la grúa. Modelo 3D (10,0 m).

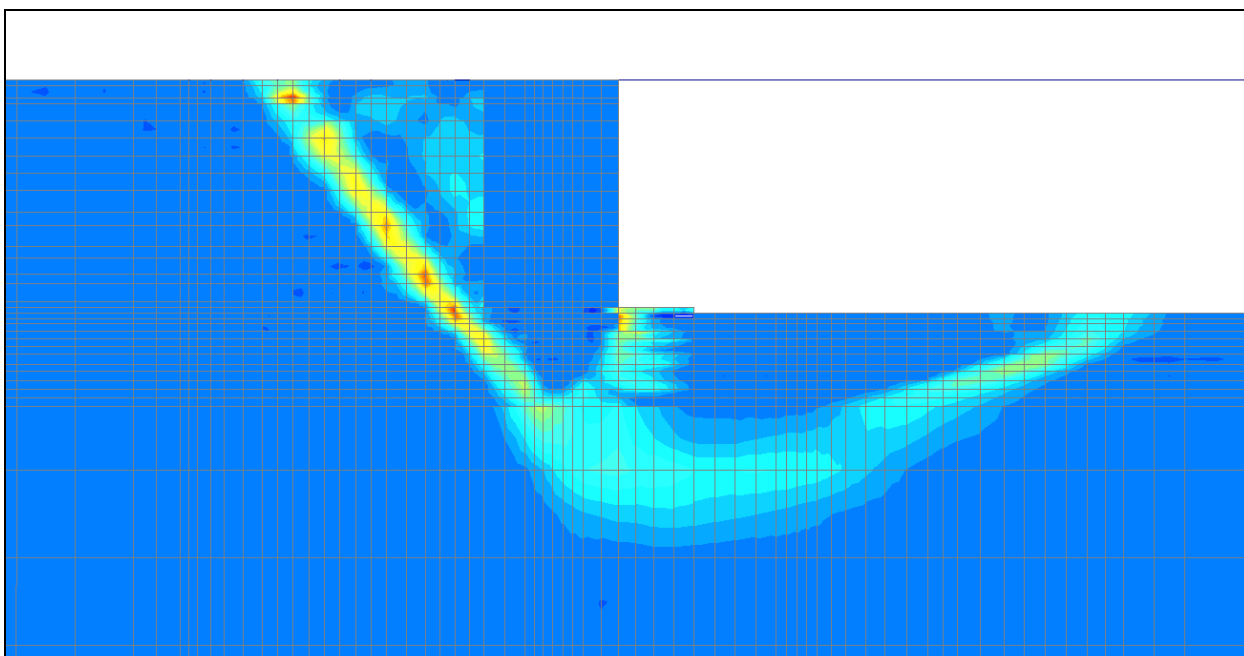


Figura 42. Deformaciones de corte en el terreno debidas a la aplicación de la carga de la grúa. Modelo 3D (125 m).

6 EFECTO TRIDIMENSIONAL

Como se ha comentado en los primeros apartados, el objetivo final del presente documento es evaluar el efecto tridimensional de las cargas en un muelle de cajones verticales de hormigón y ver cómo variaría el FS obtenido considerando dicho efecto tridimensional con el que se obtendría para la misma hipótesis de carga considerando el problema como una situación de deformación plana.

En los siguientes apartados se describirá la geometría adoptada para la evaluación del efecto tridimensional, así como las hipótesis de carga adoptadas tanto en valor de la carga de la grúa como en la posición de la misma y los factores de seguridad obtenidos.

6.1 GEOMETRÍA DEL PROBLEMA

Para el estudio del efecto tridimensional que puede tener la distribución de las cargas sobre el muelle, se ha considerado una alineación de muelle de 200,0 m, equivalente a 5 cajones de 40,0 m de eslora. El modelo realizado tendrá, por lo tanto, un largo de 400,0 m por un ancho de 200,0 m (equivalente a 5 cajones).

Se ha considerado que dichos cajones estarán separados 0,30 m entre ellos y que no existe una superestructura que los arriestre en coronación, actuando de esta manera como estructuras independientes que deben hacer frente a las sollicitaciones a las que se las someta de forma individual. Cabe indicar que estas hipótesis no se darán en la realidad debido a que el contacto entre cajones se rellena con material granular y hormigón en masa (lo que genera cierta fricción entre cajones) y la ejecución de la superestructura, que solidariza los cajones en coronación y contribuye a la repartición de las cargas tanto de ataque y amarre de los buques como de las grúas y sobrecargas sobre el muelle.

En la figura siguiente se muestra en planta la malla generada para el modelo de 5 cajones. Se puede observar que se ha refinado alrededor de los 3 cajones centrales, ya que es donde se han tomado los puntos de control y por lo tanto se requerirá de resultados más precisos.

No se ha considerado oportuno refinar la malla en las zonas con una malla más grosera puesto que no conduce a resultados significativos y incrementa en gran magnitud el tiempo de cálculo del modelo.

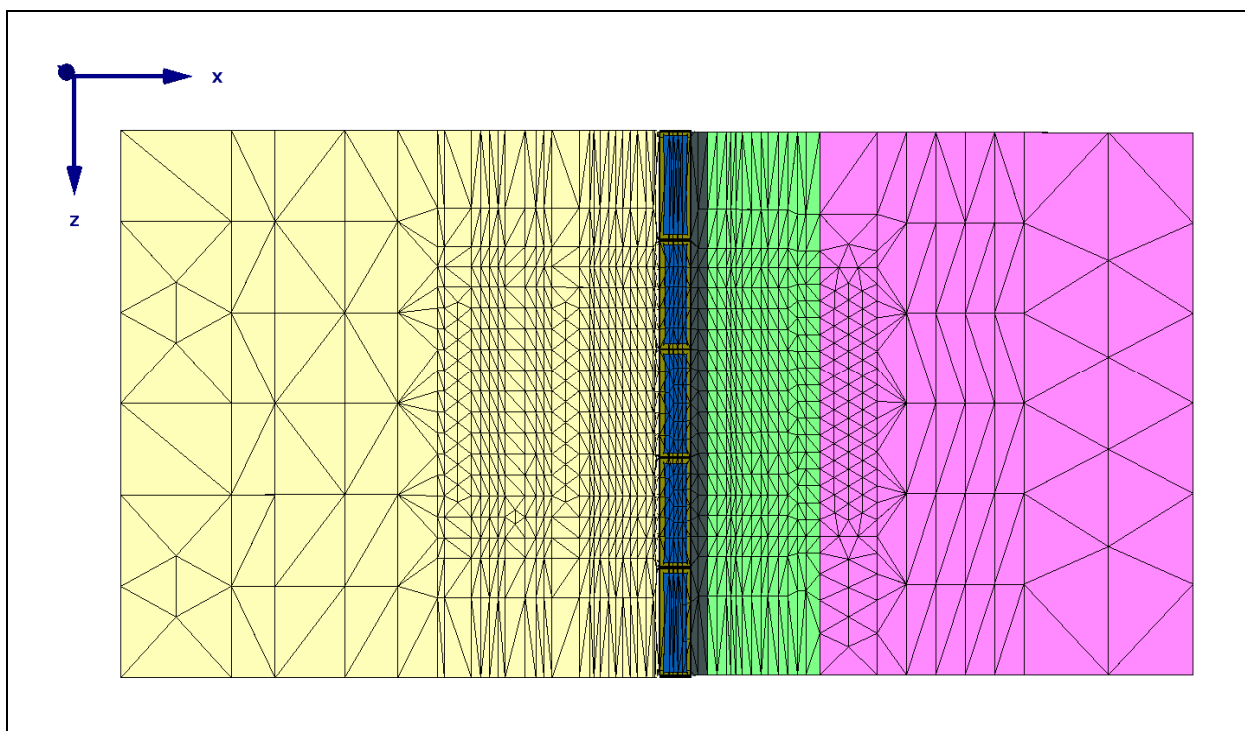


Figura 43. Geometría y malla en planta para el modelo de 5 cajones.

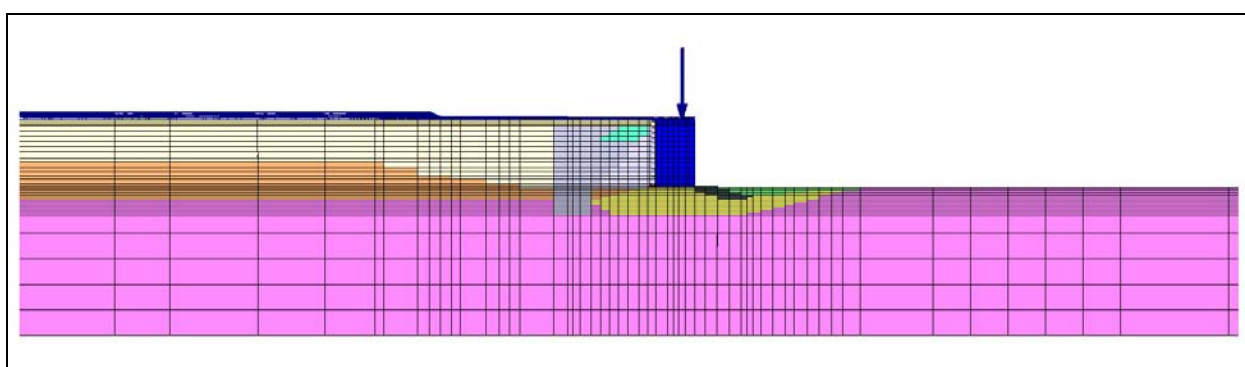


Figura 44. Vista en alzado del modelo de 5 cajones.

A continuación se muestra una vista general del modelo de 5 cajones realizado para el estudio del efecto tridimensional.

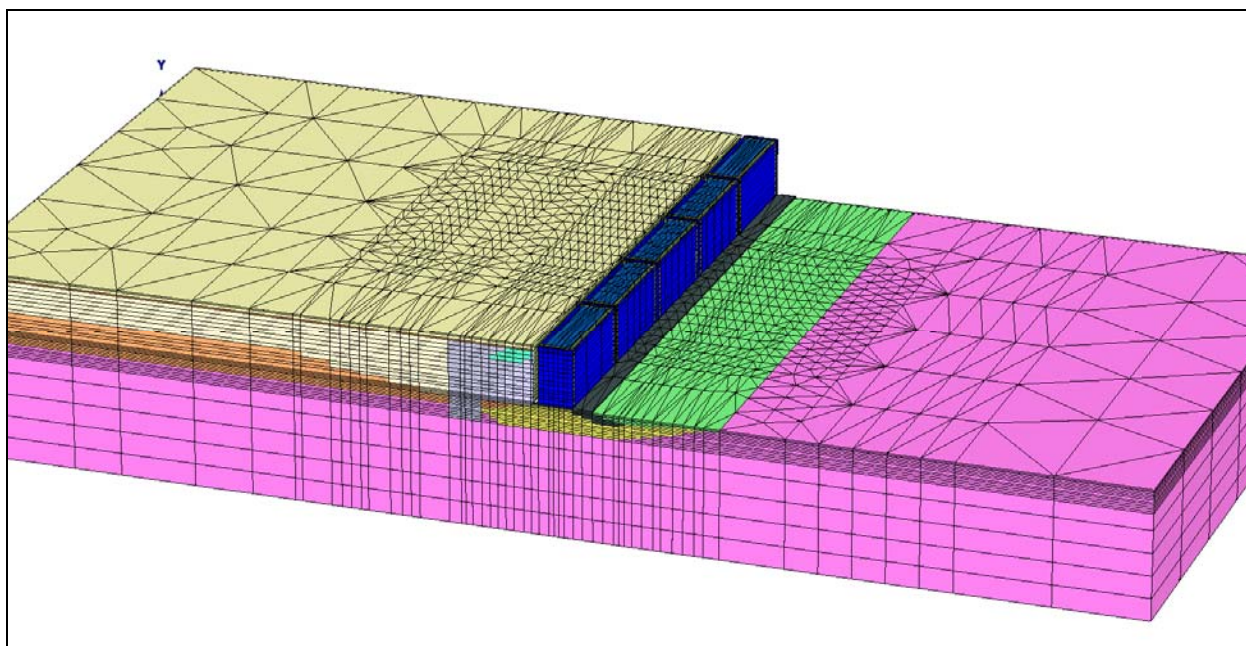


Figura 45. Vista general del modelo de 5 cajones.

6.2 HIPÓTESIS DE CARGA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CAJONES CARGADOS

Para comprobar el efecto tridimensional de las cargas se ha realizado un estudio de la variación del FS en función del número de cajones cargados con una determinada carga de grúa.

Se han considerado grúas de 4 patas con una carga en servicio por pata (peso propio + carga de grúa) de 7.000 kN, teniendo por lo tanto, una carga total de 28.000 kN. Las dos patas delanteras recaerán sobre el muelle de cajones, mientras que las traseras recaerán sobre el trasdós de éste. Se considerará por lo tanto, la carga de grúa transmitida sobre el muelle por las dos patas delanteras, equivalente a una carga por grúa de 14.000 kN.

Considerando que cada cajón se comportará como un sólido rígido y que repartirá la carga de grúa en toda su eslora (40,0 m), se ha convertido la carga de la grúa en una carga lineal en todo el largo de la eslora. Esto equivale a una carga lineal de $14.000 \text{ kN} / 40 \text{ m} = 350 \text{ kN/m}$ por grúa.

Para el análisis que se llevará a cabo a continuación, se ha supuesto que cada cajón albergará una grúa y se irá incrementando el número de cajones cargados para observar la variación del FS en función de éstos.

En las siguientes figuras se muestran los modelos realizados para el estudio de la variación del FS en función del número de cajones cargados, es decir, considerando el efecto tridimensional.

Hipótesis 1: Carga sobre 1 cajón

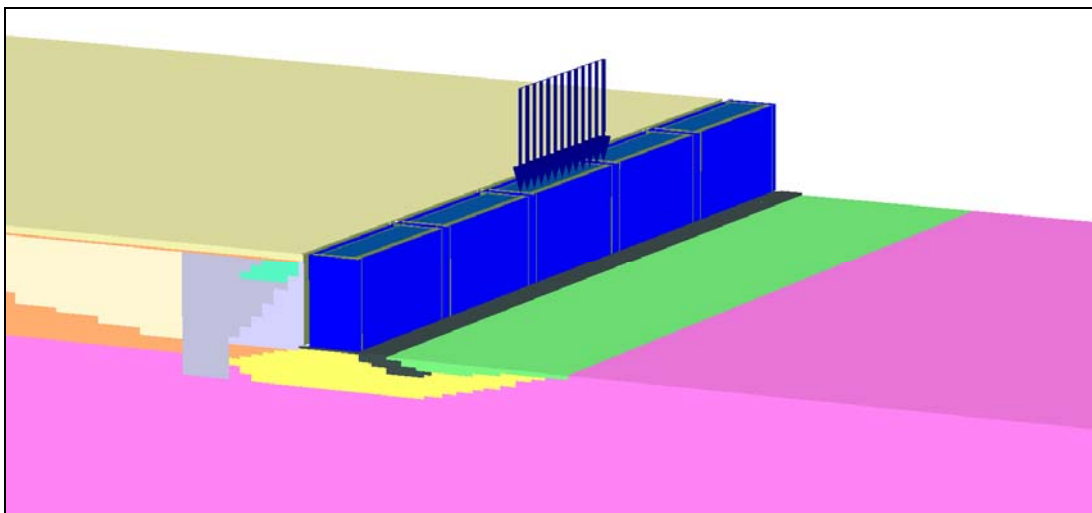


Figura 46. Modelo con carga de grúa sobre el cajón central.

Hipótesis 2: Carga sobre 2 cajones

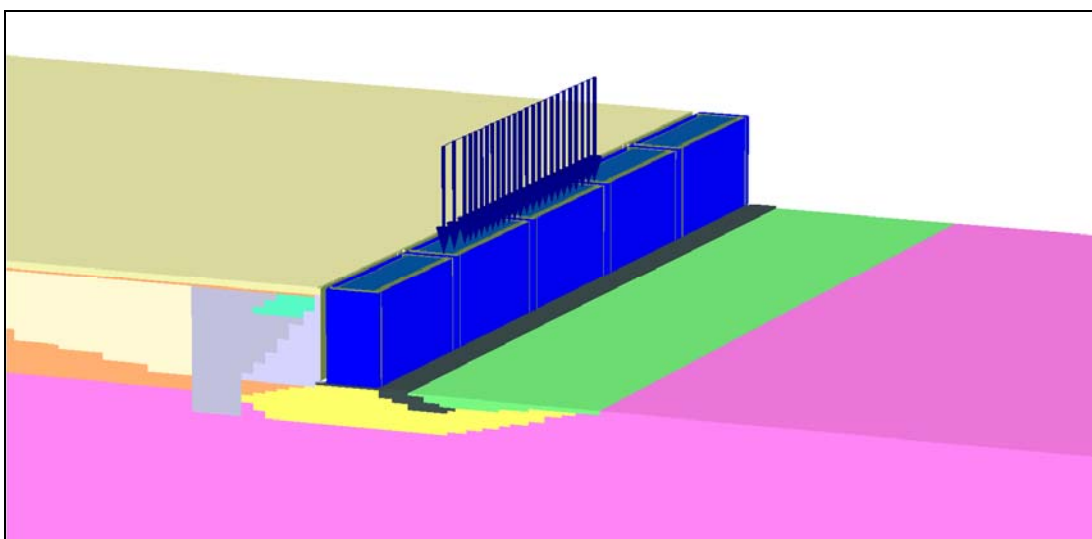


Figura 47. Modelo con carga de grúa sobre dos cajones.

Hipótesis 3: Carga sobre 3 cajones

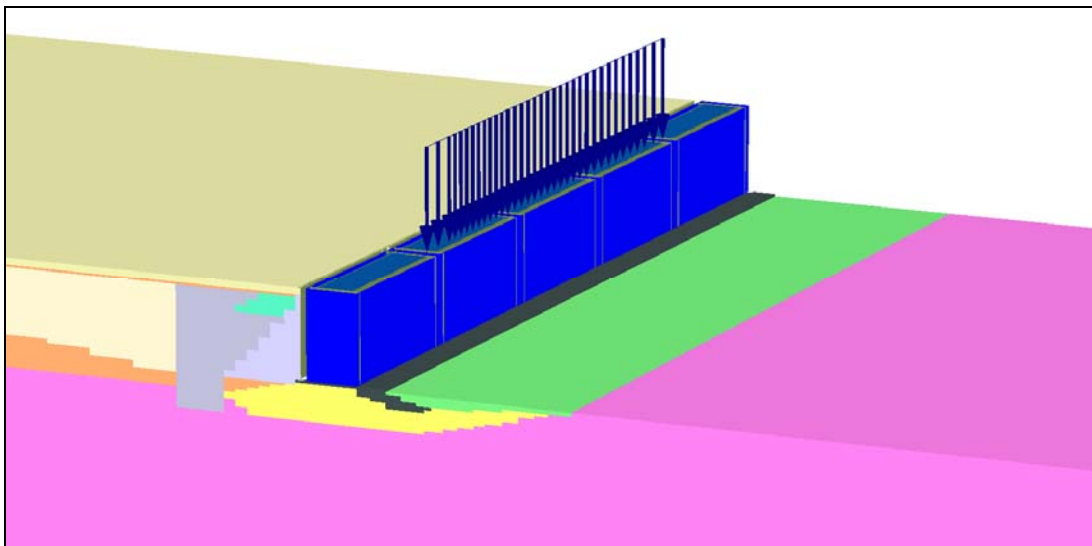


Figura 48. Modelo con carga de grúa sobre los tres cajones centrales.

Hipótesis 4: Carga sobre 5 cajones

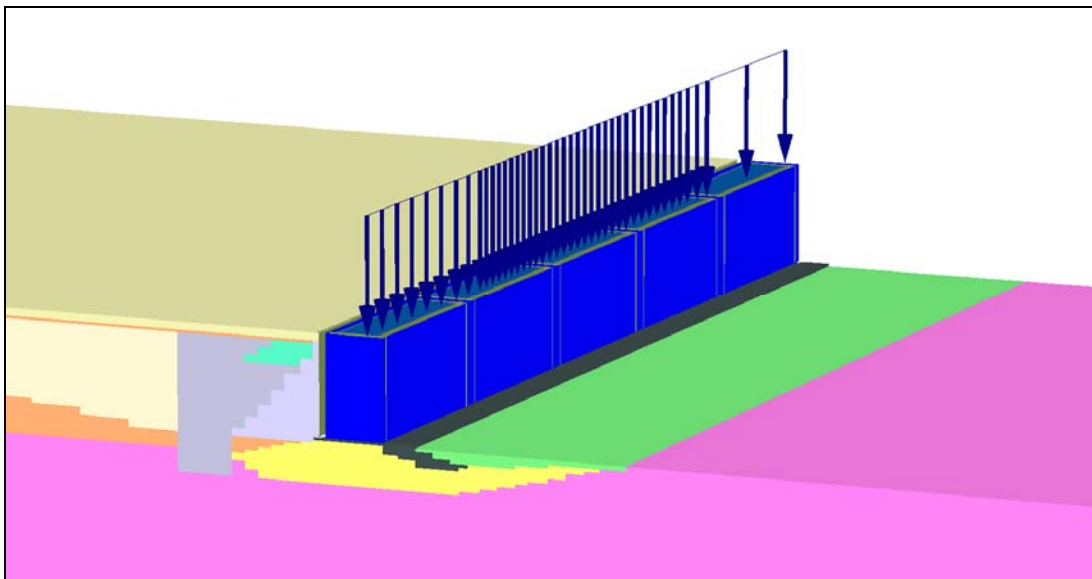


Figura 49. Modelo con carga de grúa sobre los cinco cajones.

6.2.1 RESULTADOS HIPÓTESIS 1 (CARGA 1 CAJÓN)

Tal como se ha comentado anteriormente, el modelo realizado está formado por una alineación de muelle consistente en 5 cajones que trabajan de forma independiente frente a las solicitaciones a las que son sometidos.

En este caso se ha considerado una carga lineal de 350 kN/m sobre el cajón central del modelo, siendo éste el caso objeto de estudio con más efecto tridimensional. Al estar la malla más refinada entorno dicho cajón y al ser éste el caso en que el cajón cargado se ubica a más distancia de los bordes del modelo, el presente caso será objeto de un estudio más detallado.

Los desplazamientos obtenidos tanto en el terreno de trasdós como en los cajones son un dato importante a tener en cuenta ya que serán decisivos en la determinación de la operatividad del muelle. En la figura Figura 50 se pueden observar los desplazamientos totales en las fases consideradas no drenadas (aplicación de las cargas de servicio en el trasdós del muelle y carga de grúa). Se extrae que los desplazamientos máximos (en este caso, asientos) se esperan en la explanada del muelle a una distancia de unos 105 m desde el cantil. Se puede observar también el comportamiento de los cajones, que actúan independientes bajo las cargas que los solicitan.

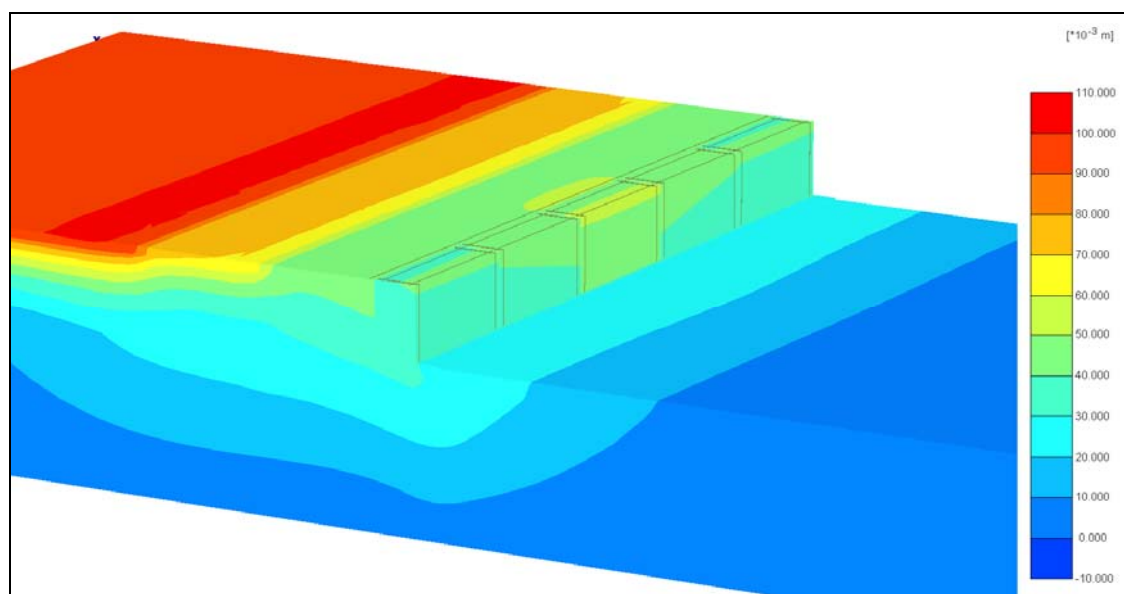


Figura 50. Desplazamientos totales tras la aplicación de las cargas en fase de servicio (caso no drenado).

Al considerarse de gran importancia el comportamiento del cajón y del trasdós de éste bajo la aplicación de la carga en fase de servicio, se muestran en la siguiente figura los desplazamientos totales tras la aplicación sobre el cajón de la carga de grúa considerada en fase de servicio (350 kN/m).

Por un lado, puede observarse que los desplazamientos máximos totales estimados debidos a la carga de la grúa serán de 1,4 cm en coronación del cajón lado mar. Por otro, puede observarse el efecto que tiene la aplicación de la carga de grúa sobre un único cajón, el comportamiento del terreno teniendo en cuenta la interacción terreno-estructura así como el comportamiento de los cajones adyacentes al cargado; en definitiva, el efecto tridimensional.

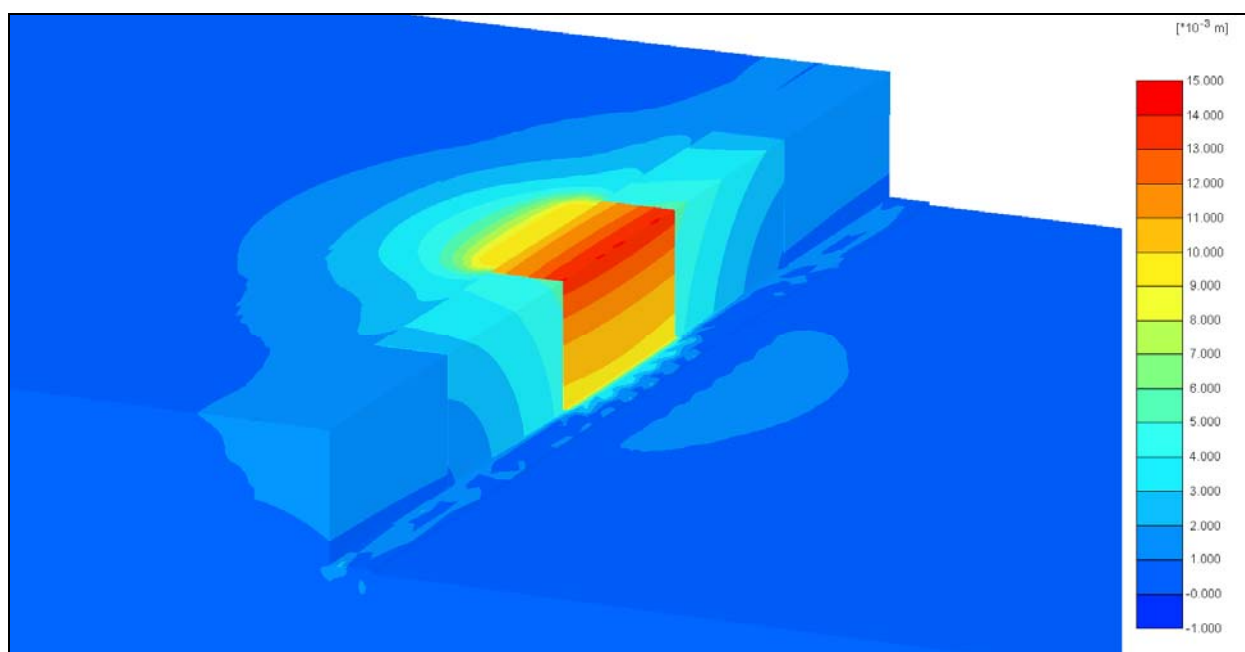


Figura 51. Desplazamientos totales debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m).

Dichos desplazamientos tendrán una componente vertical (hundimiento del cajón) y otra horizontal (vuelco rígido y vuelco plástico del cajón). Por lo tanto, se considera oportuno mostrar el comportamiento del cajón y del terreno adyacente en lo que tanto a desplazamientos verticales como horizontales se refiere. En las siguientes figuras se muestran dichos desplazamientos.

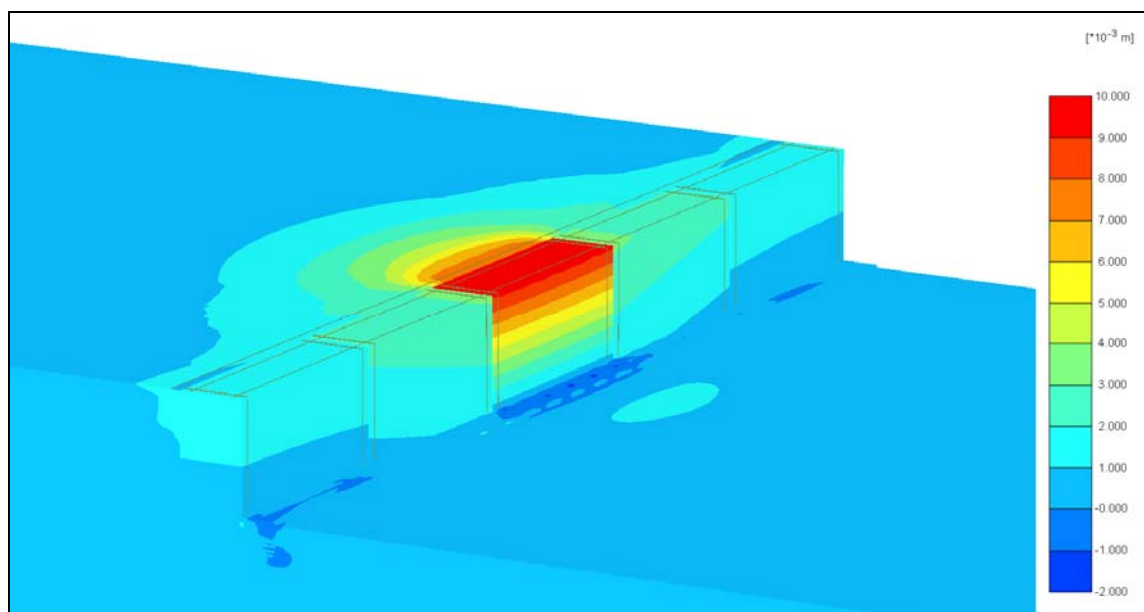


Figura 52. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m).

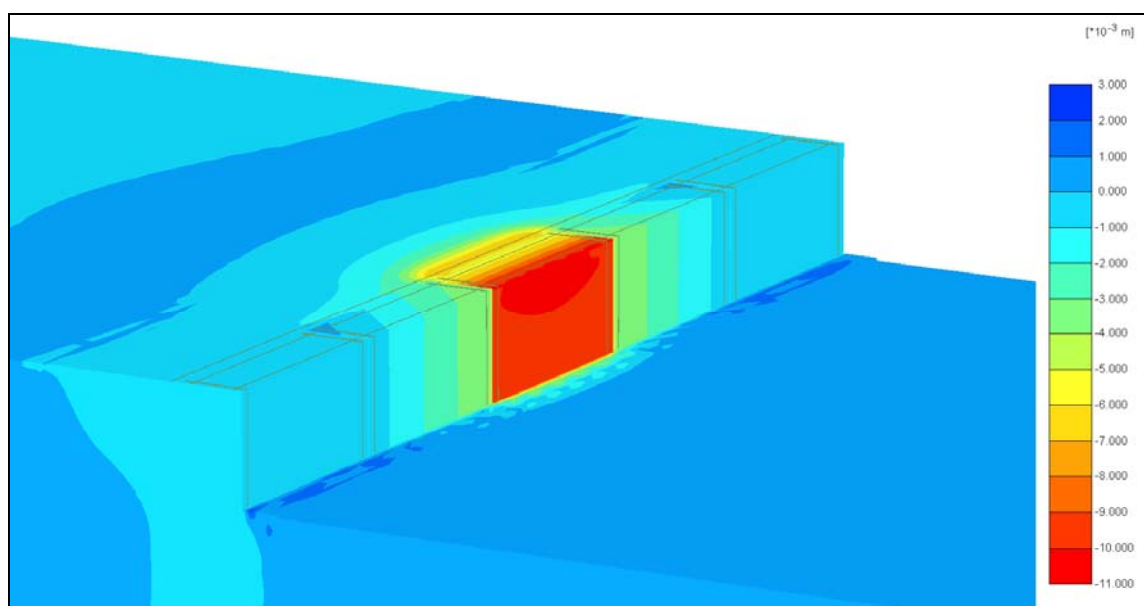


Figura 53. Desplazamientos verticales (u_y) debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m).

De la Figura 52 y Figura 53 puede observarse el comportamiento del cajón como un sólido rígido, ya que las líneas tanto de desplazamientos verticales como de desplazamientos horizontales son paralelas en todo el cajón cargado. Puede observarse también el giro de los cajones adyacentes al cargado tanto en el plano z-y (en el caso de los desplazamientos verticales) como en el plano x-z (en el caso de los desplazamientos horizontales).

Se ha realizado un corte por el centro de los cajones en el sentido longitudinal al muelle para estudiar cómo varían a lo largo de dicha sección los desplazamientos totales, verticales y horizontales en función de las cargas aplicadas. En la Figura 59 se muestra el corte (A-A*) realizado para la obtención de las mencionadas variables.

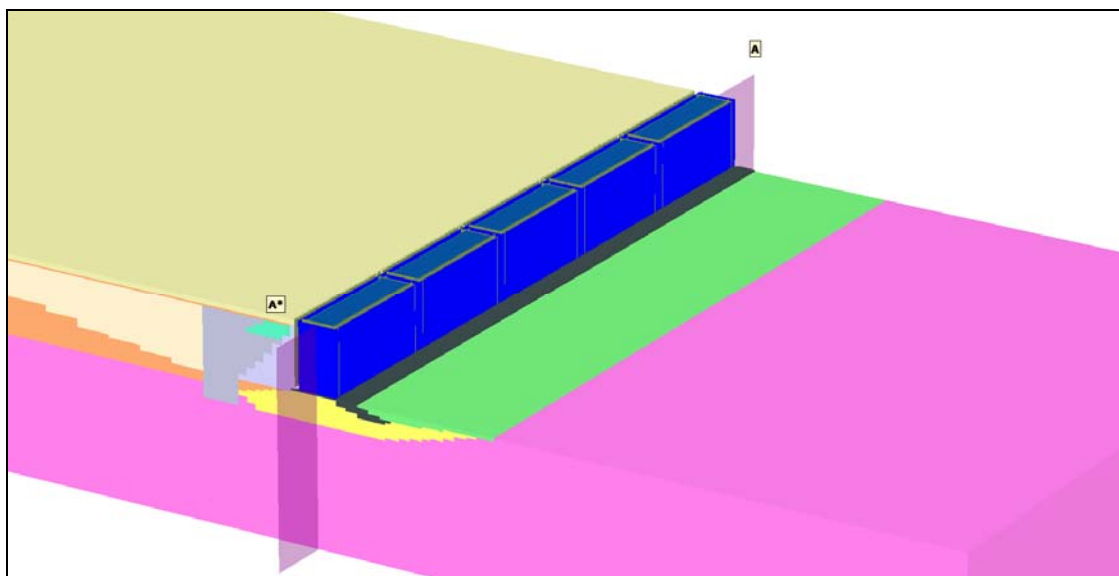


Figura 54. Sección realizada en sentido longitudinal al muelle.

En la figura siguiente se muestran los desplazamientos totales tras las fases de aplicación de las cargas mediante proceso no drenado.

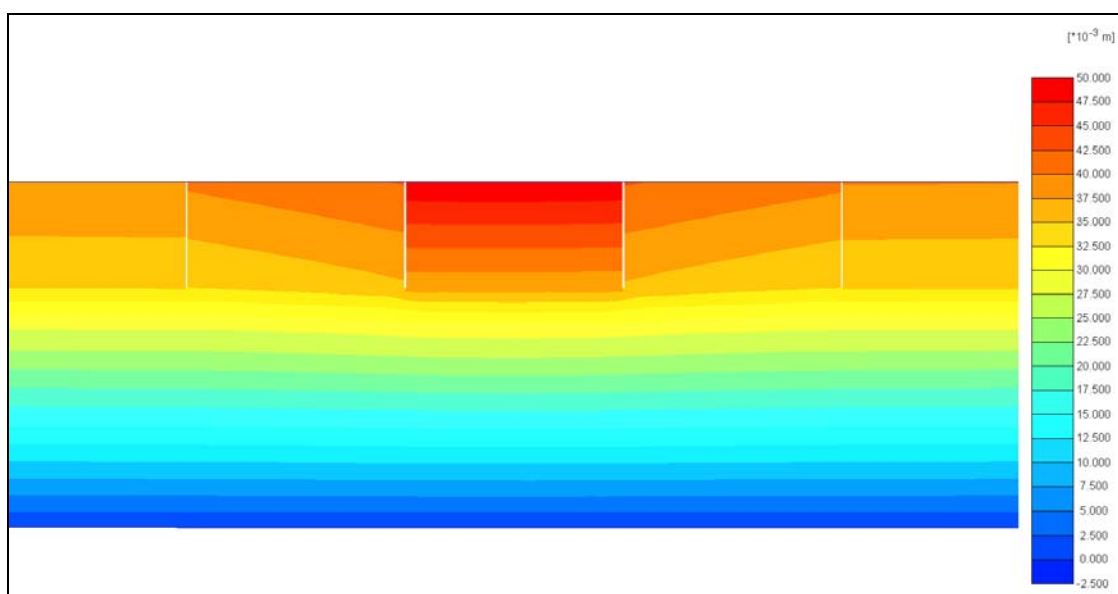


Figura 55. Desplazamientos totales tras aplicación de cargas mediante proceso no drenado.

En la Figura 56 y Figura 57 se muestra la variación de los desplazamientos horizontales (u_x) y los desplazamientos verticales (u_y) en los cajones y el terreno debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m) en una sección longitudinal al muelle. En dichas figuras se puede observar el efecto que tiene la carga del cajón central en los cajones adyacentes.

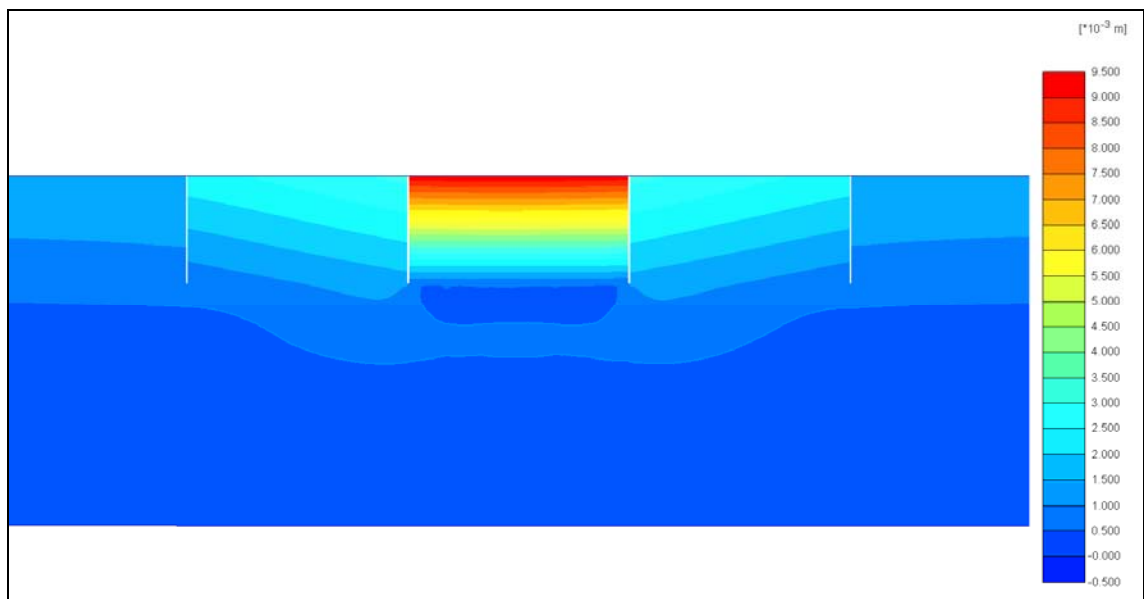


Figura 56. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m).

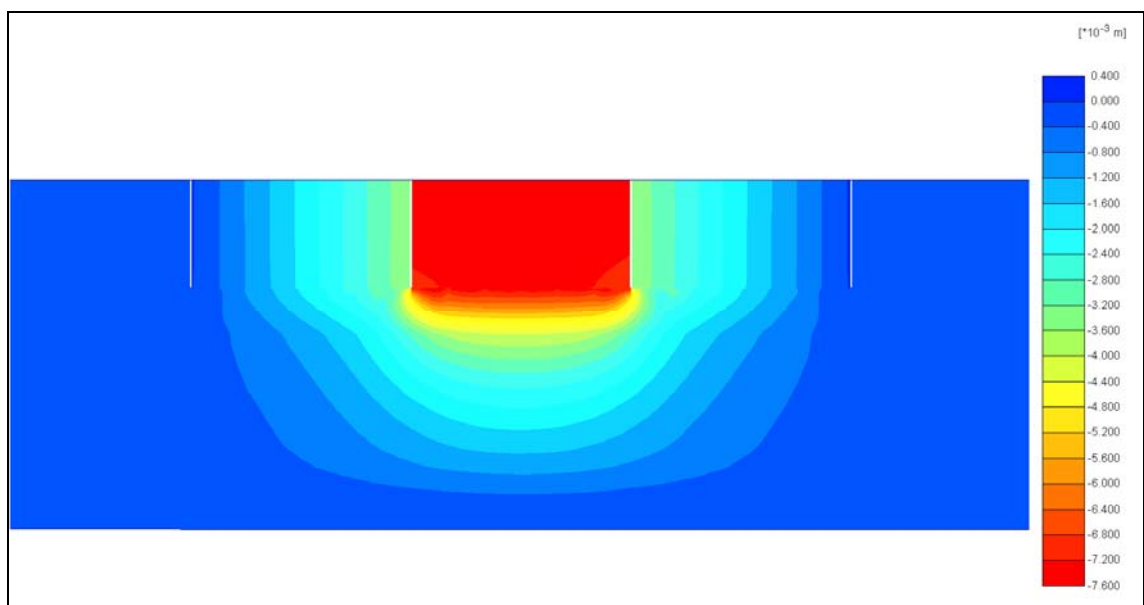


Figura 57. Desplazamientos horizontales (u_y) debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m).

La aplicación de la carga de grúa supone un incremento de tensiones importante al pie del cajón que provoca la plastificación del terreno en dicho punto. En la Figura 58 puede observarse el incremento de tensiones en el terreno debidas a la aplicación de la grúa.

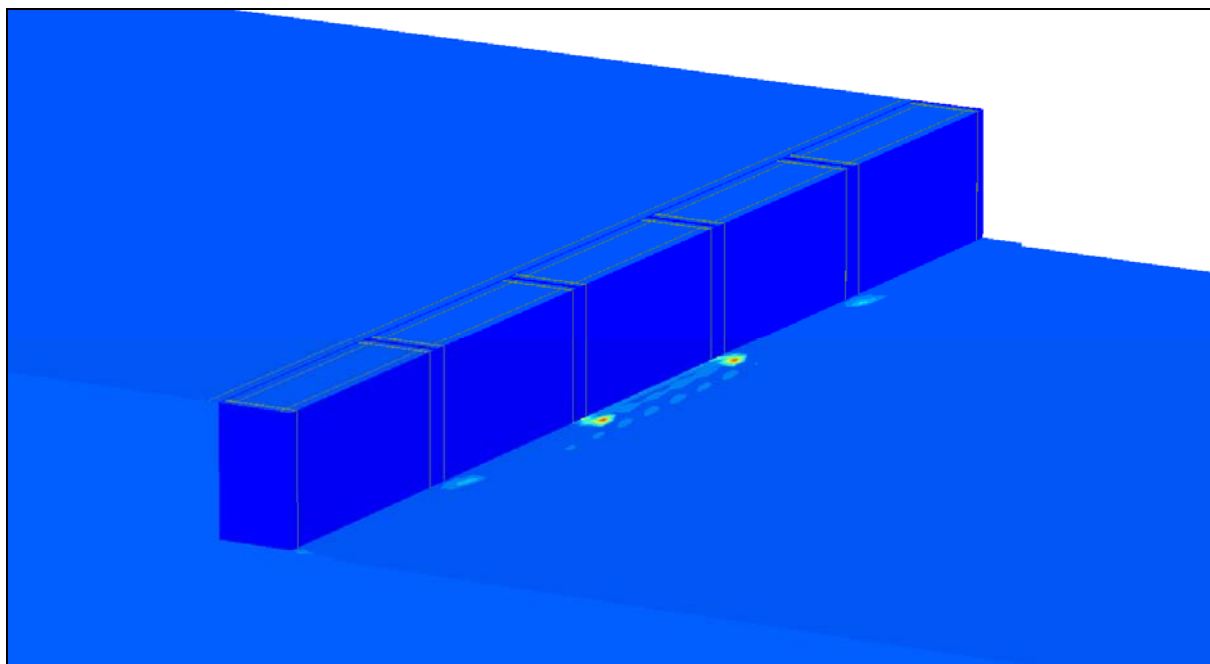


Figura 58. Incremento de deformaciones de corte debidas a la aplicación de la carga de grúa.

Se ha realizado un corte por el centro del modelo (y por lo tanto en este caso, del cajón cargado objeto de estudio), para el estudio de diferentes variables como serían los desplazamientos totales, verticales y horizontales en sección, el exceso de presión de poro generada por la aplicación de la grúa y los incrementos tensionales debidos a la aplicación de ésta al pie del muelle. En la Figura 59 se muestra el corte (A-A*) realizado para la obtención de las mencionadas variables.

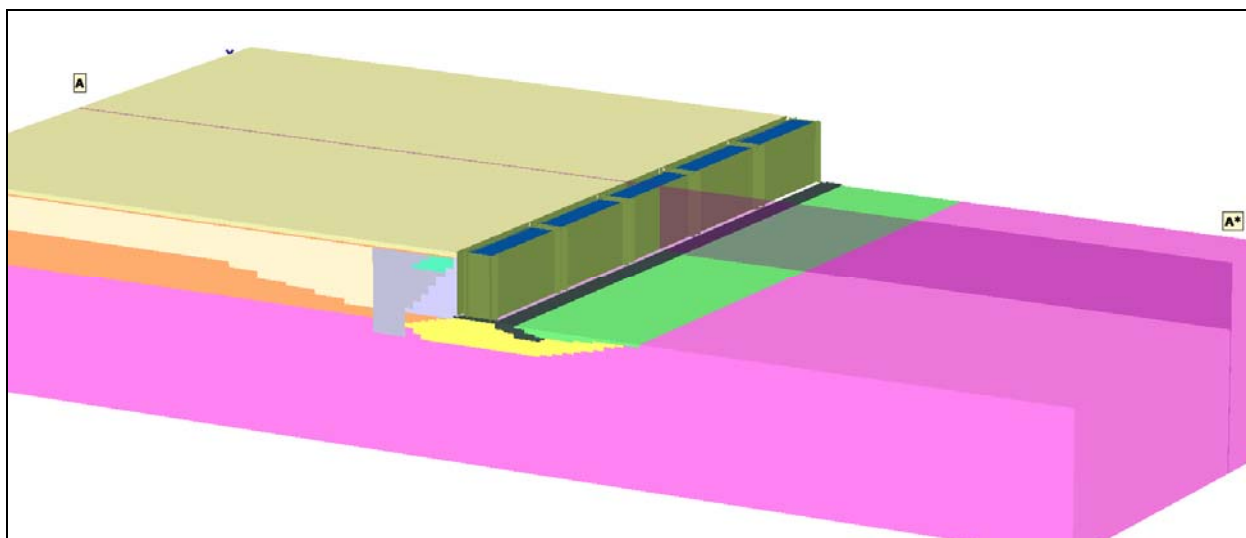


Figura 59. Corte realizado en el modelo para la determinación de desplazamientos y tensiones en dicho plano.

De la figura siguiente puede observarse, aparte de los desplazamientos totales sufridos por el cajón central del modelo, la interacción del terreno con el cajón. Tal como se ha comentado en las figuras anteriores, el desplazamiento total estimado del cantil del muelle es de 1,4 cm.

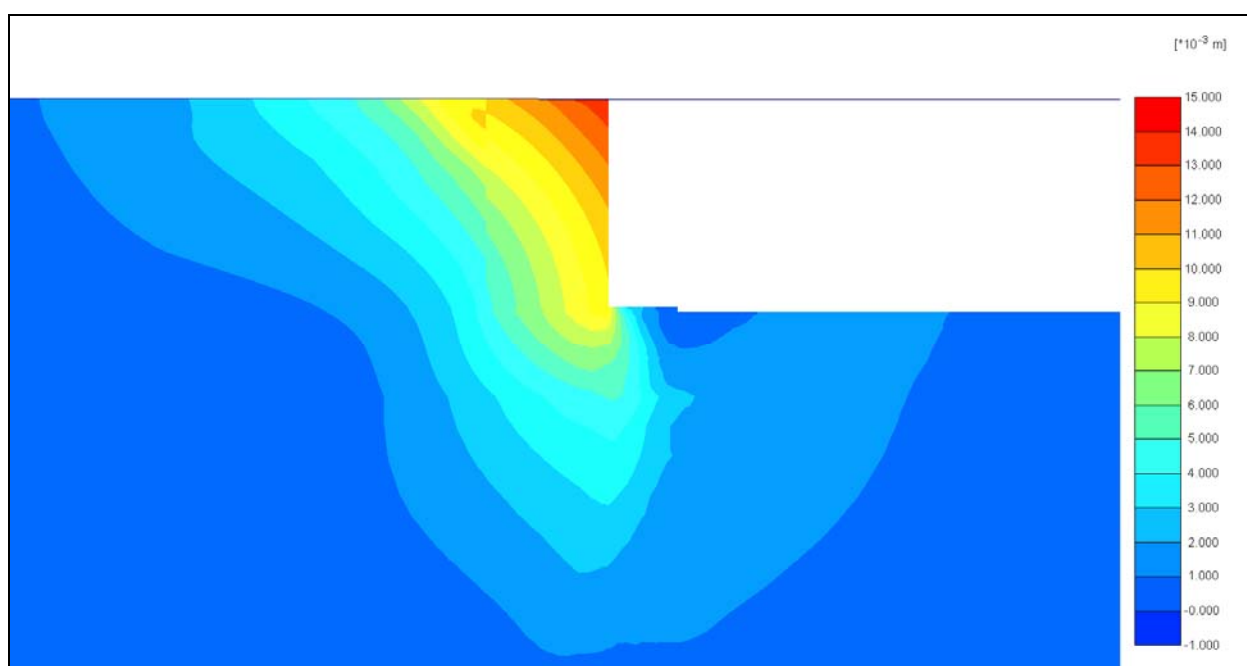


Figura 60. Desplazamientos totales (u_y) debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m).

Como se ha realizado con las figuras tridimensionales anteriores, para observar los movimientos tanto verticales como horizontales del cajón y en el interior del terreno de trasdós, se adjuntan a continuación dichas figuras para la sección (A-A*) considerada.

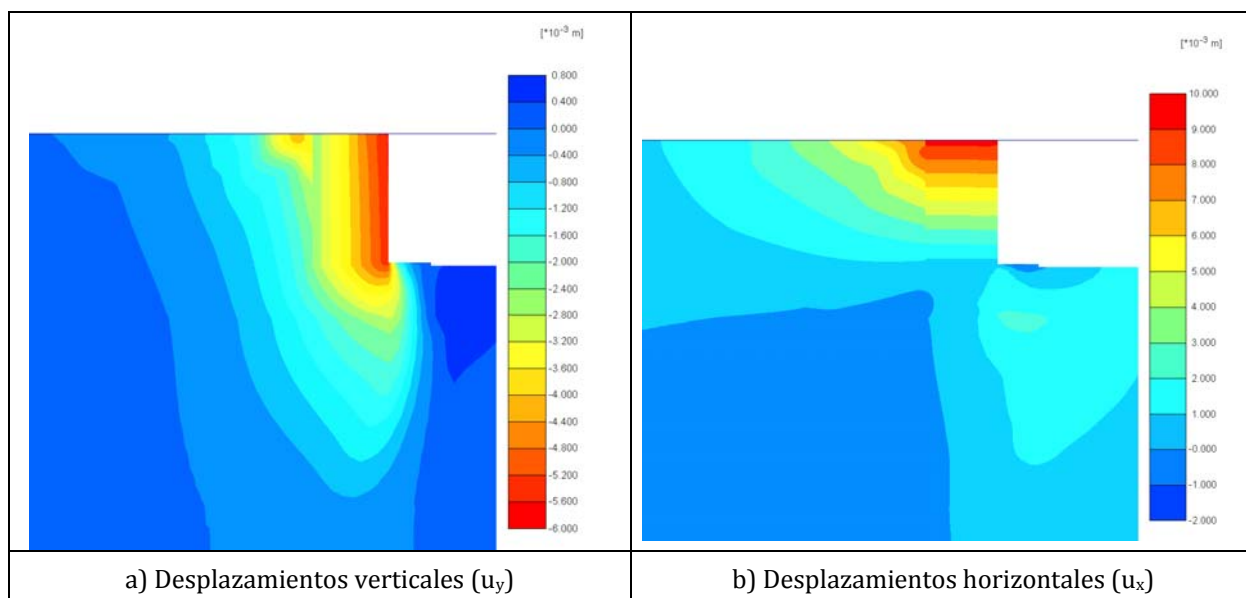


Figura 61. Desplazamientos verticales (u_y) y horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa.

Del mismo modo que se ha podido observar el incremento de tensiones en el pie del muelle (mediante el incremento de deformaciones de corte) debidas a la aplicación de la carga de la grúa para la figura tridimensional, se adjunta a continuación la figura donde se muestran las direcciones principales de deformación.

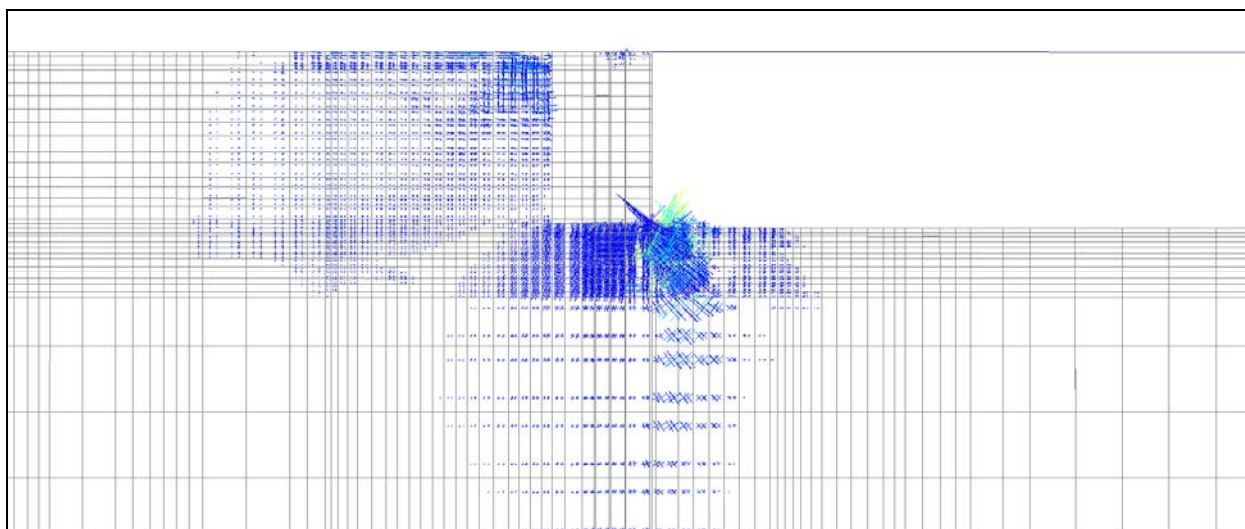


Figura 62. Direcciones principales de deformación debidas a la aplicación de la grúa.

Tal como se ha comentado anteriormente, se ha considerado oportuno adjuntar la figura del exceso de presión de poro generada por la aplicación de la grúa. Puede observarse de la distribución del exceso de presión de poro que la aplicación de la carga de la grúa supone un exceso de presión de poro de entre 30 y 40 kN/m² en toda la vertical.

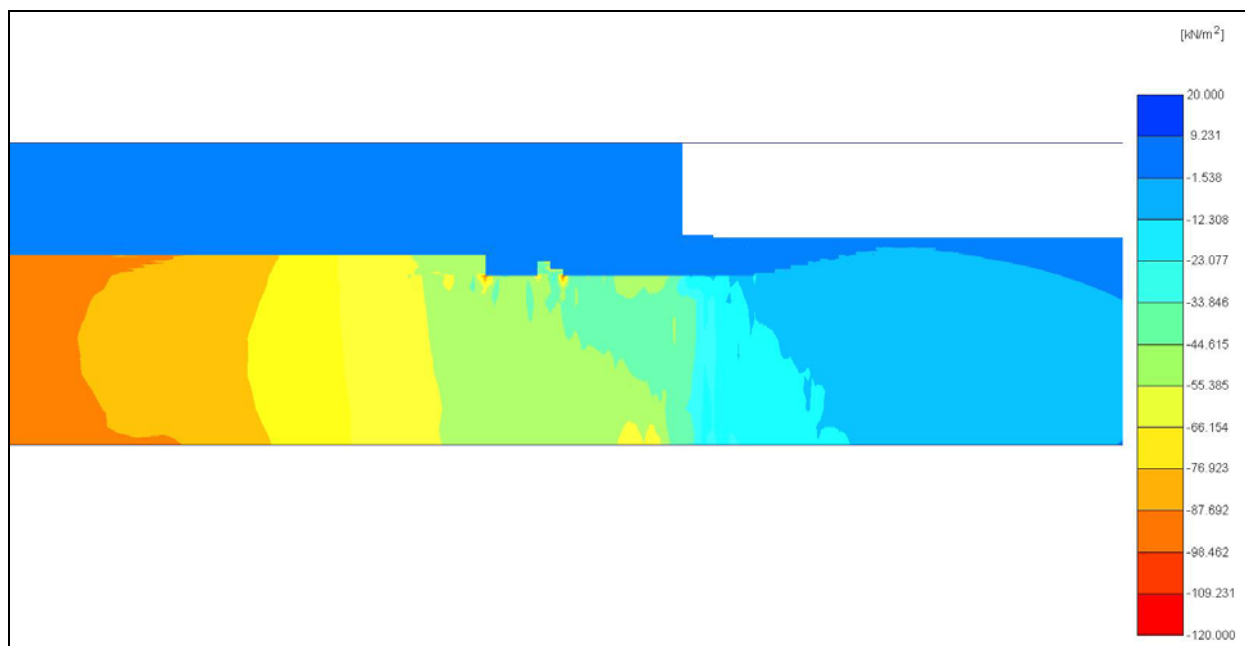


Figura 63. Distribución del exceso de presión de poro tras la aplicación de la carga de la grúa.

Obtención del Factor de Seguridad

Tal como se ha realizado en la calibración de los modelos 2D-3D, la obtención del FS se ha basado en la colocación de una carga mucho mayor de la que se sabe que podrá resistir el terreno y en el estudio del valor alcanzado de ΣM_{stage} , equivalente al porcentaje de la carga aplicada que es capaz de soportar el terreno.

En base a eso, se ha procedido a colocar sobre el cajón central del modelo una carga de grúa 20 veces mayor a la carga de servicio (7.000 kN/m) y se ha observado el valor que alcanza el multiplicador ΣM_{stage} .

En la figura siguiente se adjunta la malla deformada tras la aplicación de dicha carga (no siendo aplicada en todo su valor). Cabe indicar que los valores de los desplazamientos

obtenidos en esa fase no tienen gran relevancia, ya que la finalidad del procedimiento anteriormente explicado consiste en la obtención del FS y de la carga máxima de grúa que será capaz de soportar el muelle, en este caso, el cajón cargado con una grúa.

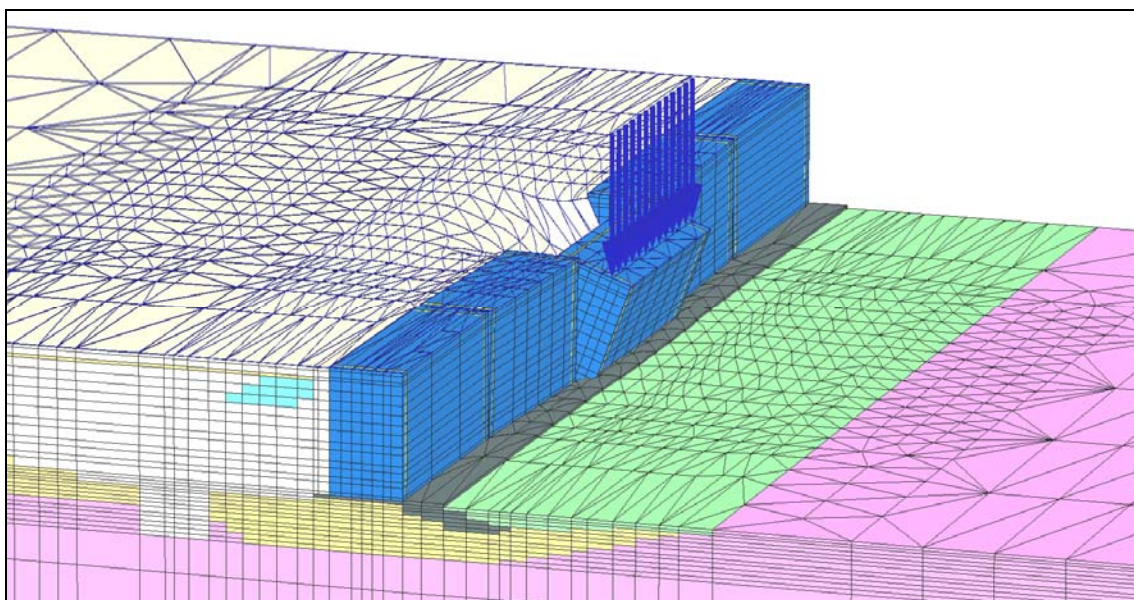


Figura 64. Malla deformada tras aplicación de carga lineal sobre el cajón central del muelle.

De la figura de las direcciones de las direcciones principales de deformación se extrae que la carga máxima de grúa admitida por el terreno viene determinada por la acumulación de tensiones que se genera al pie del cajón.

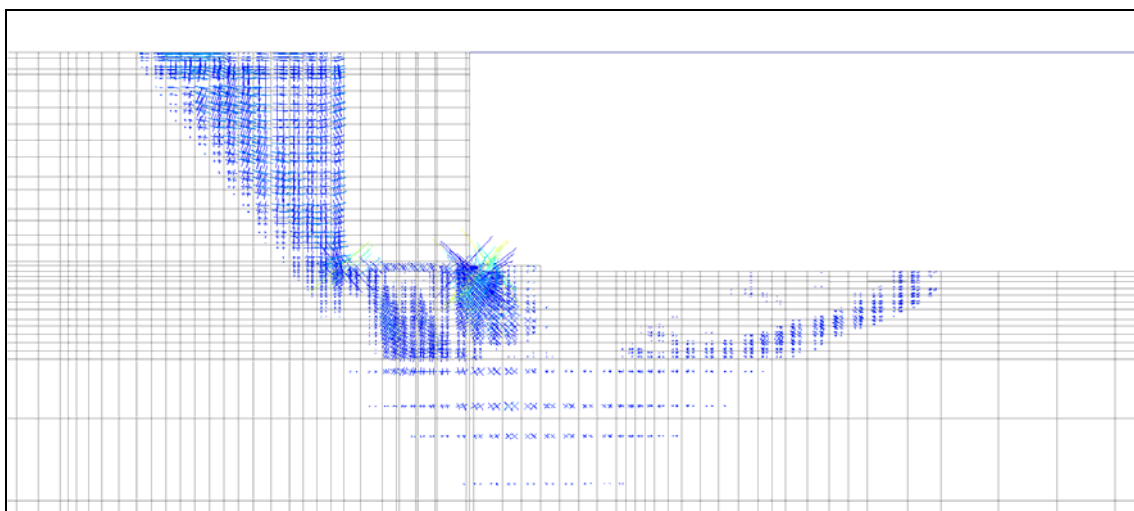


Figura 65. Direcciones principales de deformación tras aplicación de carga lineal sobre el cajón central del muelle.

Para la carga anteriormente mencionada aplicada sobre el cajón central (7000 kN/m), se ha alcanzado un valor del multiplicador ΣM_{stage} de 0,455.

Por lo tanto, considerando que el valor alcanzado de ΣM_{stage} equivale al porcentaje de la carga aplicada que es capaz de soportar el terreno, la carga última soportada por el terreno sería de 3185 kN/m. Considerando que el FS equivale a la carga última que soportará la estructura dividido por la carga aplicada (en este caso se considera una carga aplicada de 350 kN/m), el FS obtenido para la Hipótesis 1 (carga de grúa sobre el cajón central del modelo) es de **FS = 9,1**.

6.2.2 RESULTADOS HIPÓTESIS 2 (CARGA 2 CAJONES)

Para la Hipótesis 2 se ha considerado una carga lineal de 350 kN/m sobre dos cajones consecutivos del modelo (cajón central y adyacente a éste), ver Figura 47.

Tal como se ha comentado en la hipótesis anterior, los desplazamientos obtenidos tanto en el terreno de trasdós como en los cajones son un dato importante a tener en cuenta para la determinación de la operatividad del muelle. En la figura Figura 66 se pueden observar los desplazamientos totales en las fases consideradas no drenadas (aplicación de las cargas de servicio en el trasdós del muelle y carga de grúa).

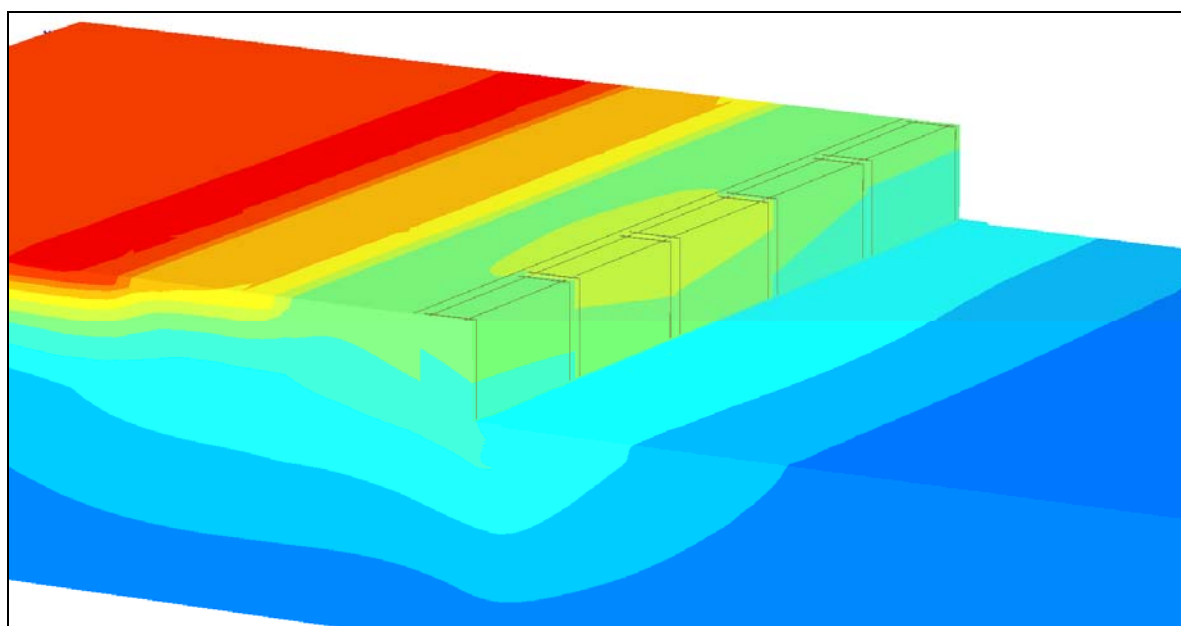


Figura 66. Desplazamientos totales tras la aplicación de las cargas en fase de servicio (caso no drenado).

Se extrae que los asientos máximos se den en la explanada del muelle a una distancia de unos 120 m desde el cantil. Se puede observar también el comportamiento cómo responden los dos cajones cargados bajo las cargas que los solicitan.

Cabe resaltar que en dicho modelo se puede observar el efecto del borde. Tal como se ha comentado en los primeros apartados en cuanto a las condiciones de contorno, los desplazamientos horizontales están impedidos en los contornos perimetrales del modelo ($u_x = u_z = 0$), los desplazamientos verticales y horizontales impedidos en el contorno inferior ($u_x = u_z = u_y = 0$) y se permiten desplazamientos totales libres en la superficie del terreno. Se permiten desplazamientos verticales en los contornos perimetrales del modelo.

Al estar impedidos los desplazamientos horizontales en el contorno del modelo, el giro del cajón que toca el borde queda impedido. En este caso, para el nivel de cargas que solicitan el muelle, esto no interfiere en el comportamiento del cajón intermedio entre el cajón que del borde y el del centro del modelo.

En la siguiente figura se muestran los desplazamientos totales tras la aplicación sobre los dos cajones de la carga de grúa considerada (350 kN/m).

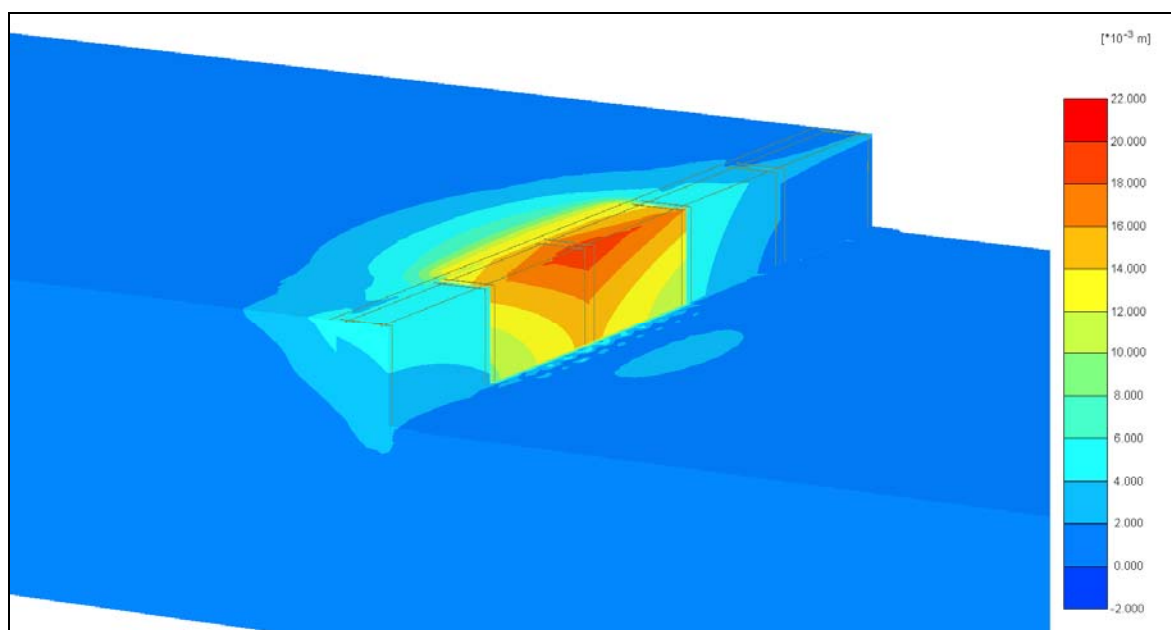


Figura 67. Desplazamientos totales debidos a la carga de la grúa (350 kN/m) sobre dos cajones.

De la Figura 67 puede corroborarse que el cajón central no tiene tanta restricción al giro como el adyacente también cargado y por lo tanto el terreno circundante a éste se deformará más (deformaciones en la parte delantera del pie del cajón central). También puede observarse que el cajón (no cargado) adyacente al central gira más que el cajón del borde adyacente al cajón cargado.

Puede observarse que los desplazamientos máximos totales estimados debidos a la carga de la grúa serán de 2,0 cm. Como se ha mostrado para la Hipótesis 1 (cajón central cargado) se muestra en las siguientes figuras el comportamiento del cajón y del terreno adyacente en lo que tanto a desplazamientos verticales como horizontales se refiere.

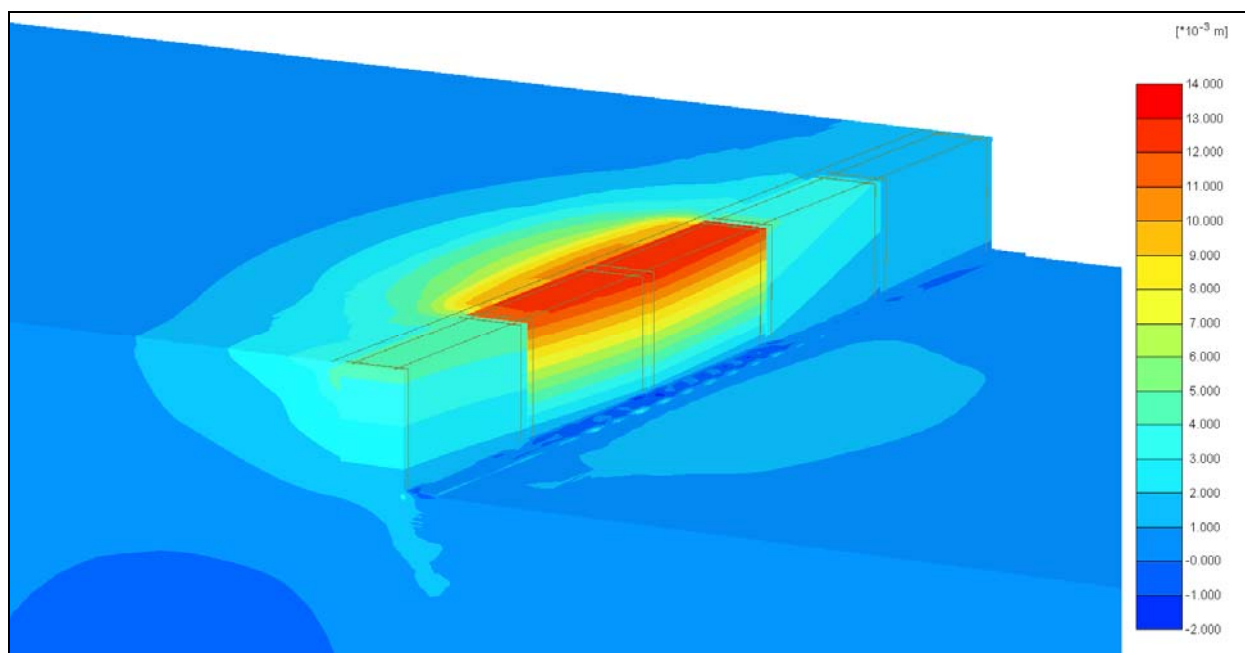


Figura 68. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa (350 kN/m) sobre dos cajones.

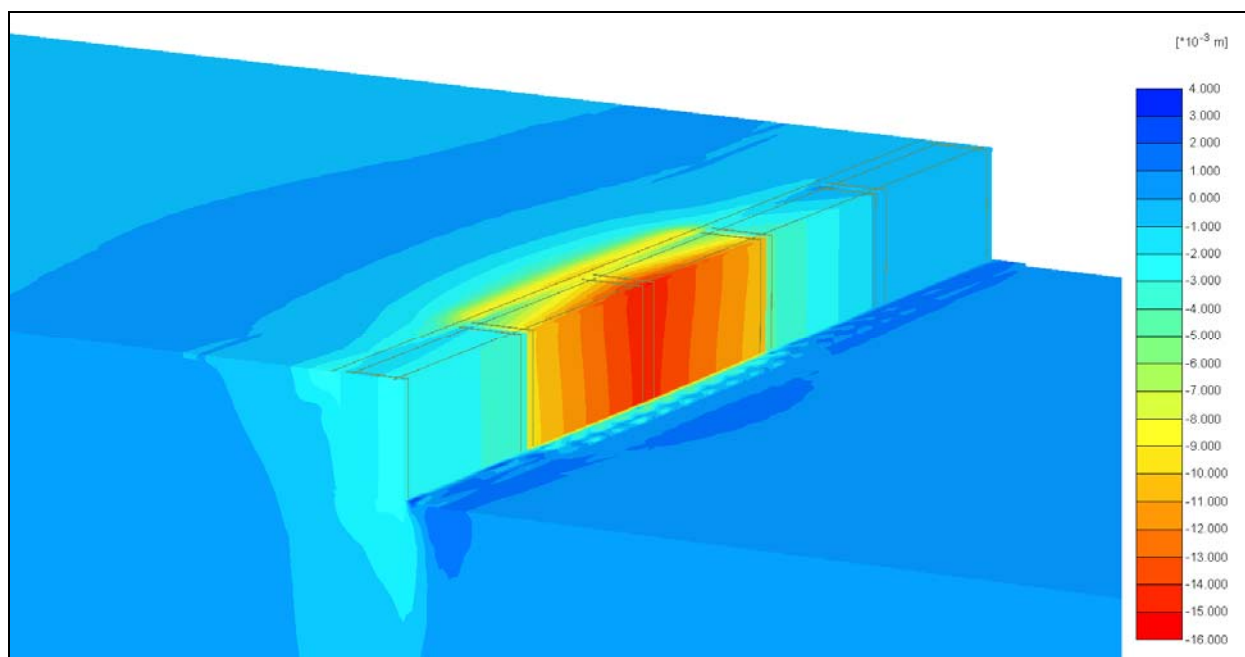


Figura 69. Desplazamientos verticales (u_y) debidos a la carga de la grúa (350 kN/m) sobre dos cajones.

Puede observarse de la Figura 68 y Figura 69 el giro de los cajones adyacentes tanto en el plano z-y (en el caso de los desplazamientos verticales) como en el plano x-z (en el caso de los desplazamientos horizontales).

A partir de un corte por el centro de los cajones en el sentido longitudinal al muelle se puede observar cómo varían a lo largo de dicha sección los desplazamientos totales, verticales y horizontales en función de las cargas aplicadas. En las figuras siguientes se observa cómo varían dichas variables.

En la Figura 70 siguiente se muestran los desplazamientos totales tras las fases de aplicación de las cargas mediante proceso no drenado.

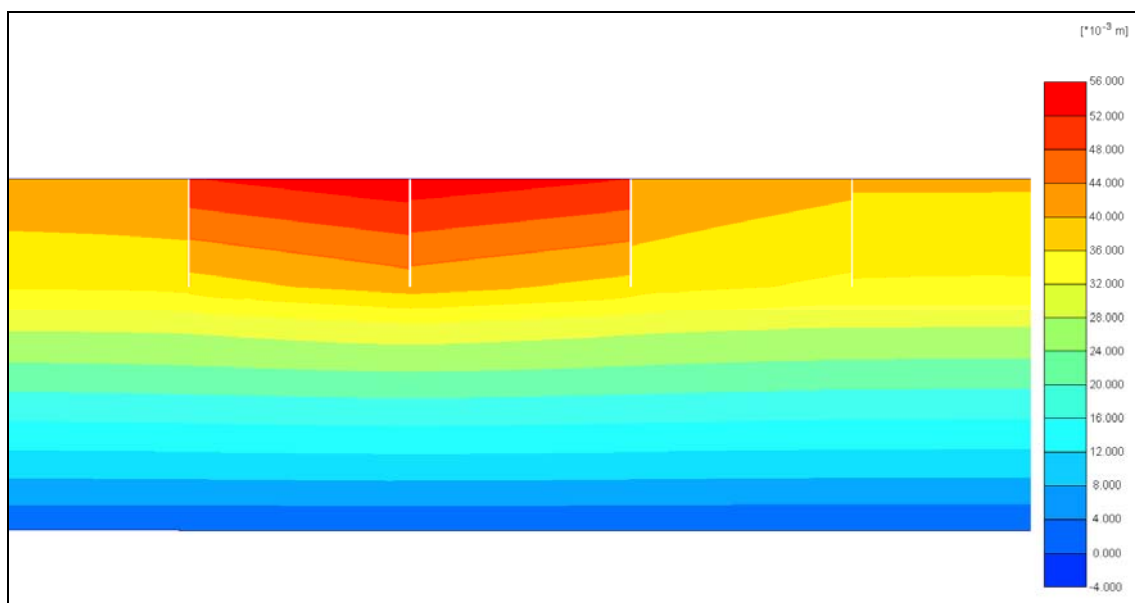


Figura 70. Desplazamientos totales tras aplicación de cargas mediante proceso no drenado.

En la Figura 71 y Figura 72 se muestra la variación de los desplazamientos horizontales (u_x) y los desplazamientos verticales (u_y) en los cajones y el terreno debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m) en una sección longitudinal al muelle. En dichas figuras se puede observar el efecto que tiene la carga sobre los dos cajones en los cajones adyacentes. Se puede observar también el efecto del borde del modelo en la parte izquierda.

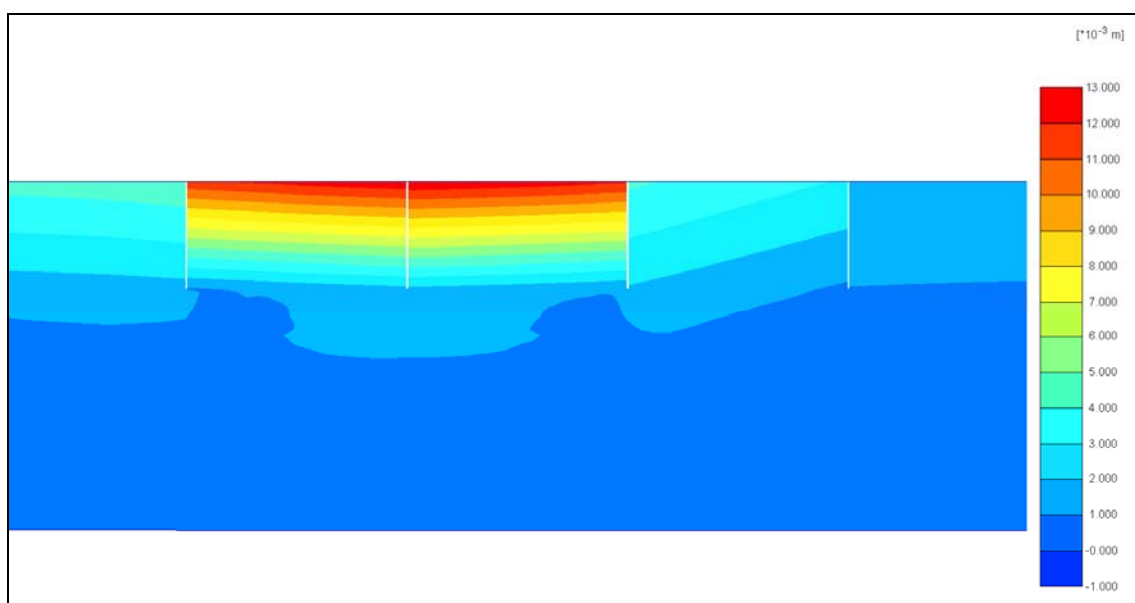


Figura 71. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa sobre dos cajones en fase de servicio (350 kN/m).

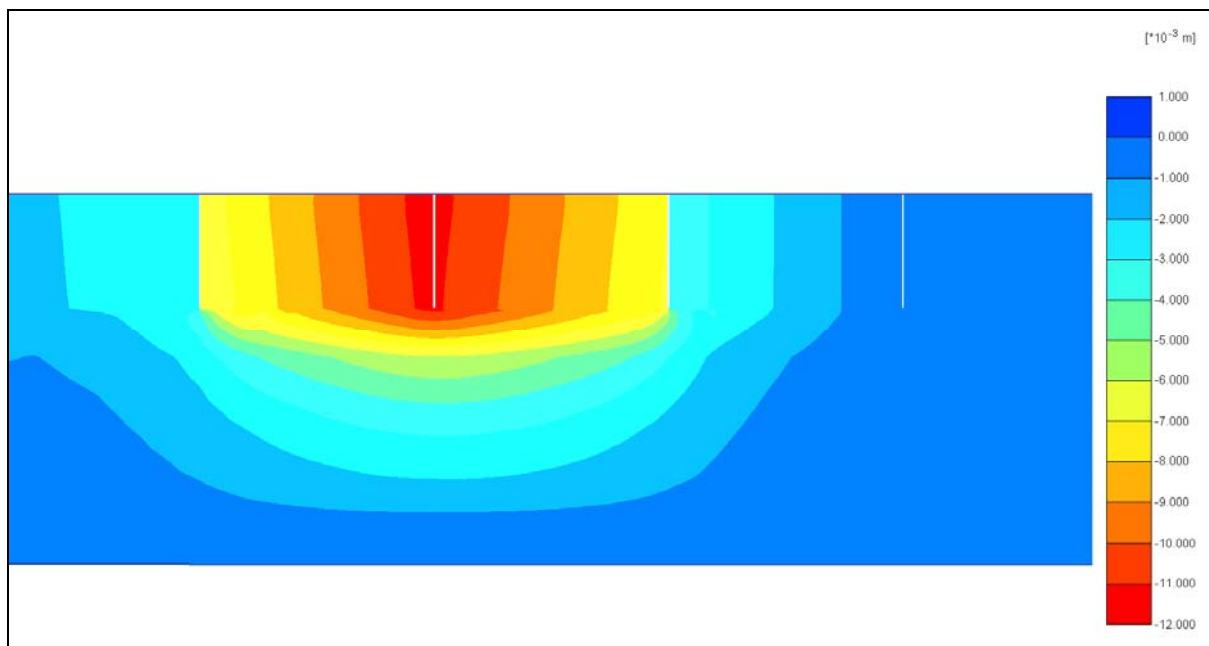


Figura 72. Desplazamientos horizontales (u_y) debidos a la carga de la grúa sobre dos cajones en fase de servicio (350 kN/m).

En la Figura 73 puede observarse el incremento de tensiones al pie del cajón que provoca la aplicación de la carga de la grúa.

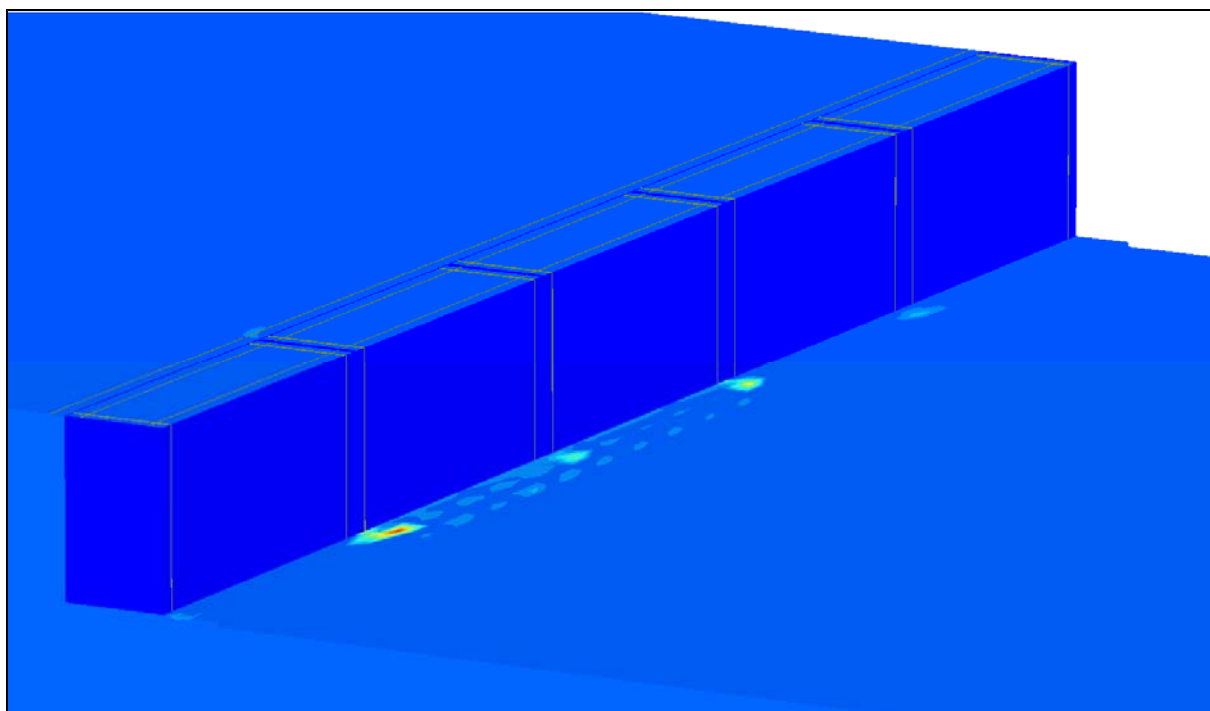


Figura 73. Incremento de deformaciones de corte debidas a la aplicación de la carga de grúa sobre los dos cajones.

Se ha realizado un corte entre los dos cajones cargados para determinar los desplazamientos totales, verticales y horizontales en dicha sección (considerada como la más desfavorable), así como los incrementos tensionales debidos a la aplicación de ésta al pie del muelle. En la Figura 74 se muestra el corte (A-A*) realizado.

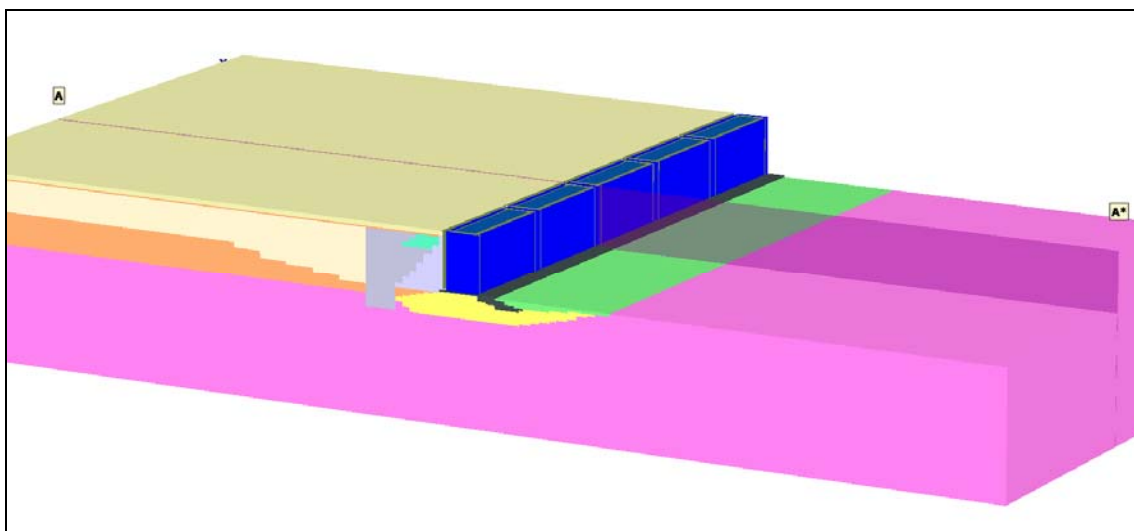


Figura 74. Corte realizado para la determinación de desplazamientos y tensiones en dicho plano.

Como el corte se ha realizado para la sección más desfavorable, en este caso ésta se encuentra entre los dos cajones cargados (en el hueco de 30 cm que separa los cajones), por lo tanto, los desplazamientos que se muestran en las figuras siguientes responden únicamente a los desplazamientos en el terreno.

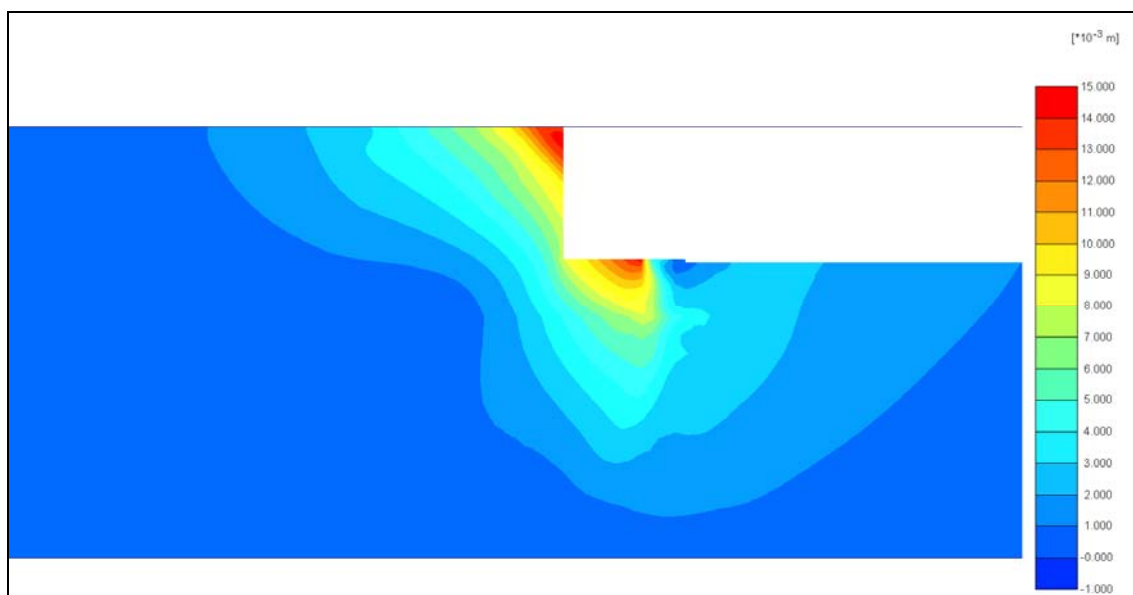


Figura 75. Desplazamientos totales en terreno ($|u|$) debidos a la carga de la grúa sobre dos cajones.

Para observar los movimientos tanto verticales como horizontales en el interior del terreno de trasdós, se adjuntan a continuación las figuras para la sección (A-A*) considerada.

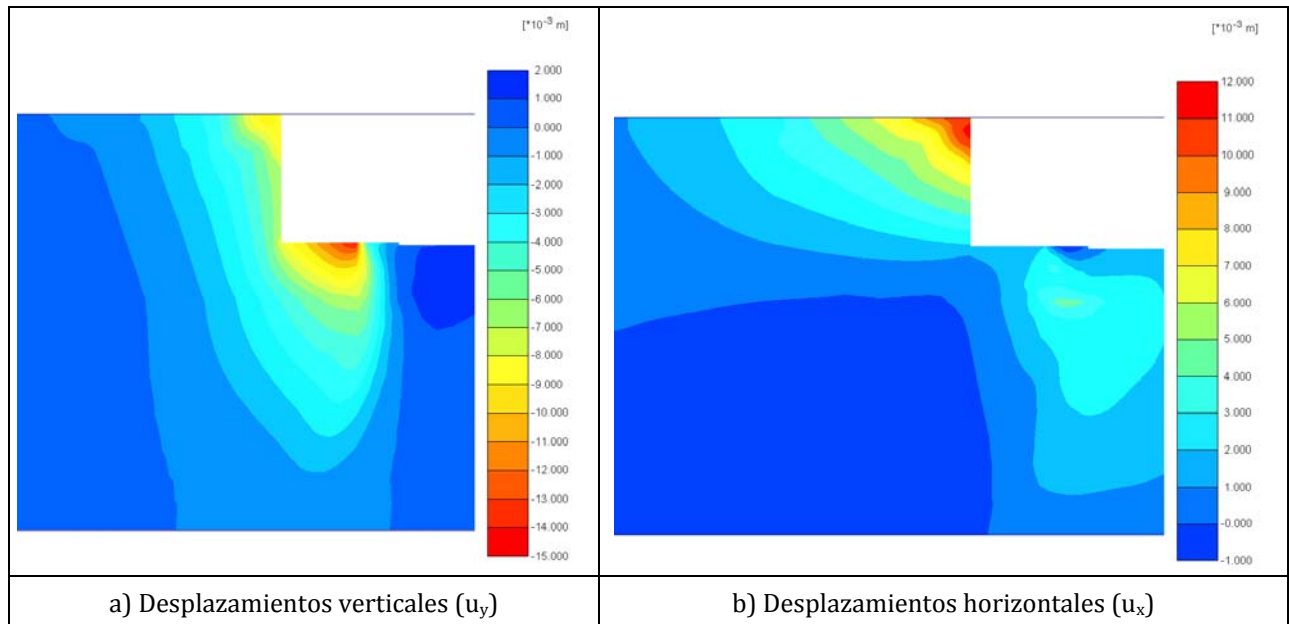


Figura 76. Desplazamientos verticales (u_y) y horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa sobre dos cajones.

Del mismo modo que se ha podido observar el incremento de tensiones en el pie del muelle (mediante el incremento de deformaciones de corte) debidas a la aplicación de la carga de la grúa para la figura tridimensional, se adjunta a continuación la figura donde se muestran las direcciones principales de deformación para la sección considerada.



Figura 77. Direcciones principales de deformación tras aplicación de carga lineal sobre los dos cajones.

Obtención del Factor de Seguridad

Tal como se ha realizado en la calibración de los modelos 2D-3D y en el caso tridimensional de la Hipótesis 1 (carga de grúa sobre cajón central), la obtención del FS se ha basado en el método de estudio del valor alcanzado del multiplicador ΣM_{stage} . En este caso, se ha colocado sobre el cajón una carga de 3.500 kN/m.

En la figura siguiente se adjunta la malla deformada tras la aplicación de la carga sobre ambos cajones.

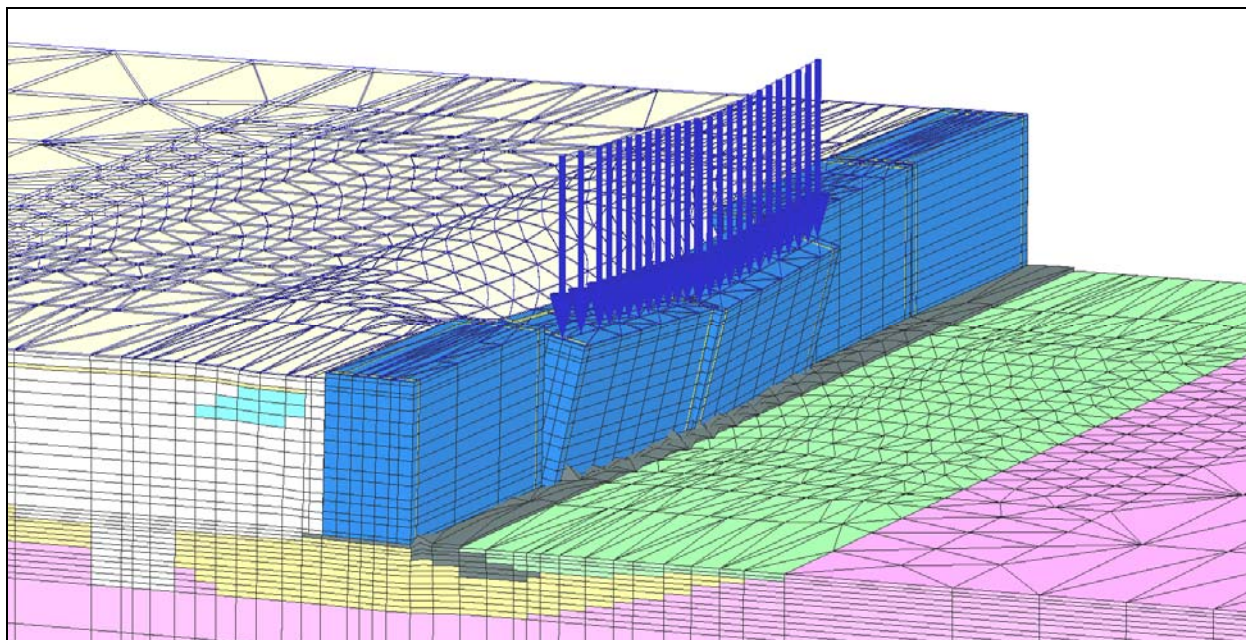


Figura 78. Malla deformada tras aplicación de carga lineal sobre dos cajones del muelle.

Para la carga anteriormente aplicada sobre los dos cajones (3.500 kN/m), se ha alcanzado un valor del multiplicador ΣM_{stage} de 0,700.

Por lo tanto, la carga última soportada por el terreno sería de 2.450 kN/m. Considerando que el FS equivale a la carga última que soportará la estructura dividido por la carga aplicada (en este caso 350 kN/m), el FS obtenido para la Hipótesis 2 (carga de grúa sobre dos cajones del modelo) es de **FS = 7,0**.

6.2.3 RESULTADOS HIPÓTESIS 3 (CARGA 3 CAJONES)

En esta hipótesis el caso objeto de estudio es la carga de grúa aplicada sobre los 3 cajones centrales del modelo, es decir una grúa sobre cada cajón. La carga lineal que simula la grúa es también en este caso de 350 kN/m.

En este caso, los desplazamientos totales obtenidos en el terreno de trasdós como en los cajones se muestran en la Figura 79. Dichos desplazamientos responden al final de las fases de cargas de servicio (proceso no drenado) aplicadas, en una primera fase las sobrecargas de tráfico y almacenamiento y en una segunda, la carga de la grúa sobre los 3 cajones centrales. Los asientos máximos esperados en este caso en la explanada se darán a unos 110 m del cantil del muelle.

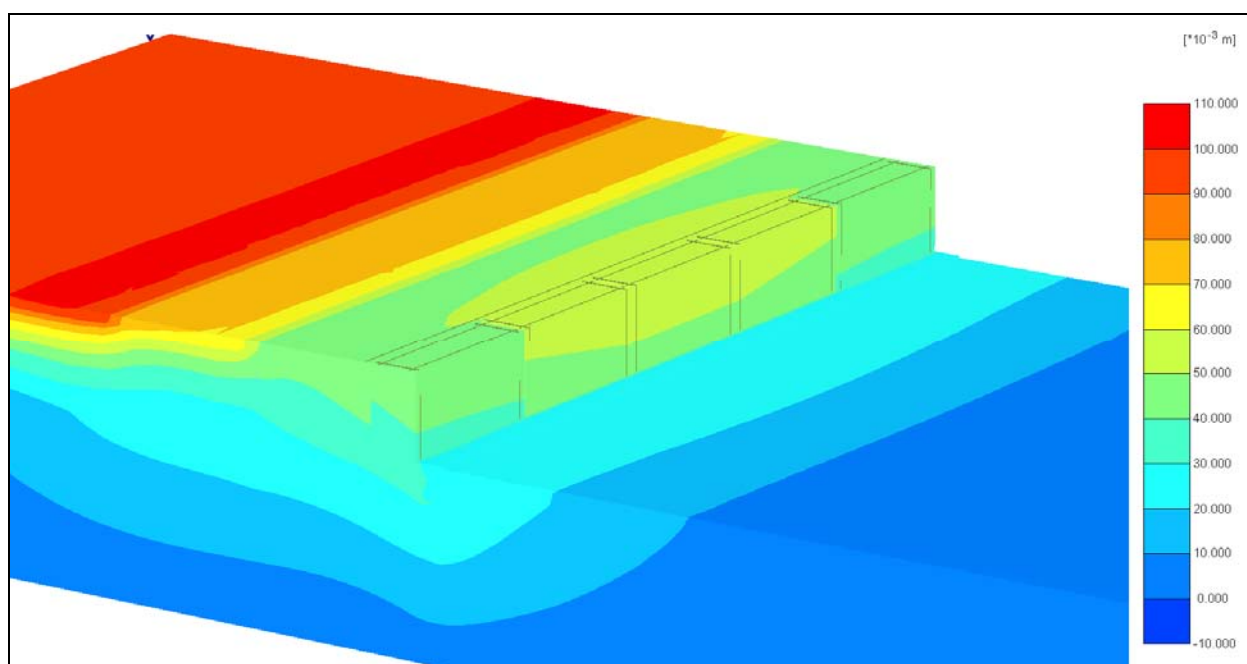


Figura 79. Desplazamientos totales resultantes de la aplicación de las cargas sobre los tres cajones centrales en fase de servicio (caso no drenado).

Al estar impedidos los desplazamientos horizontales en el contorno del modelo, y al estar los cajones analizados relativamente cerca de dicho contorno, el giro de los cajones queda prácticamente impedido.

En la siguiente figura se muestran los desplazamientos totales tras fase de aplicación sobre los tres cajones centrales de la carga de grúa considerada (350 kN/m).

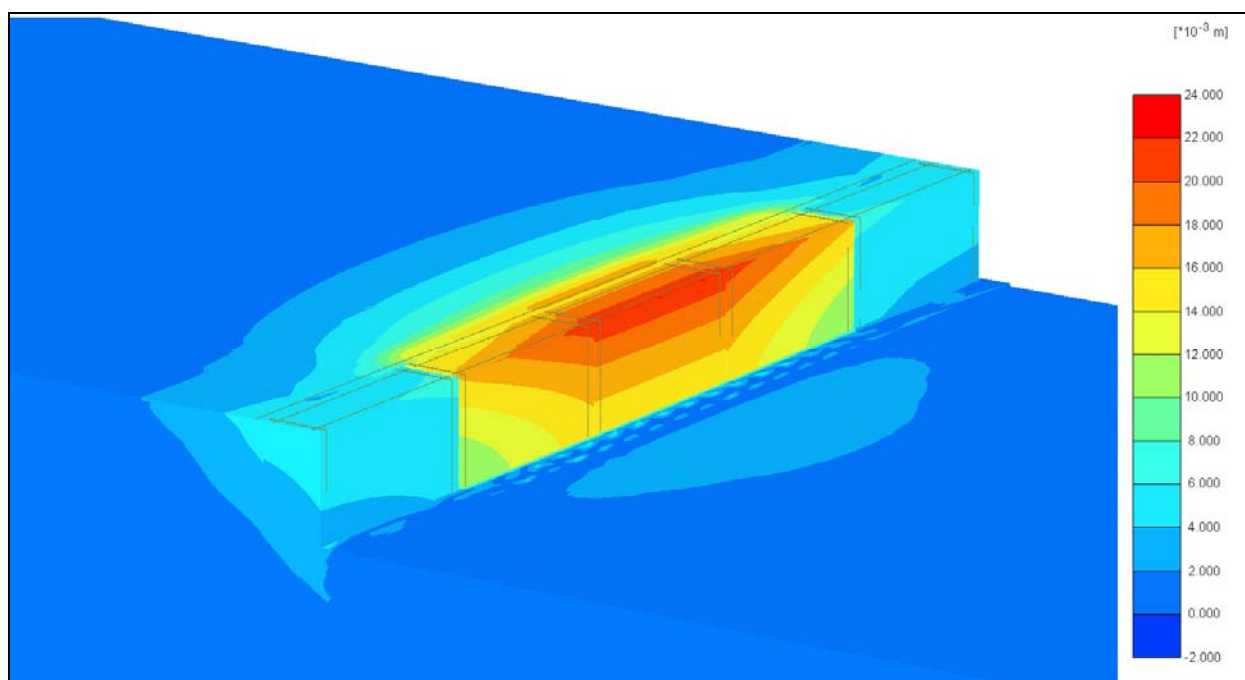


Figura 80. Desplazamientos totales debidos a la carga de la grúa (350 kN/m) sobre los tres cajones centrales.

De la Figura 80 puede observarse como los dos cajones adyacentes al cajón central sufren un giro debido a las cargas aplicadas, mientras que éste gira alrededor del eje z (plano x-y).

Puede observarse que los desplazamientos máximos totales estimados debidos a la carga de la grúa se darán en el extremo superior lado mar del cajón central y serán de 2,2 cm. Se muestra en las siguientes figuras el comportamiento de los cajones cargados y del terreno adyacente.

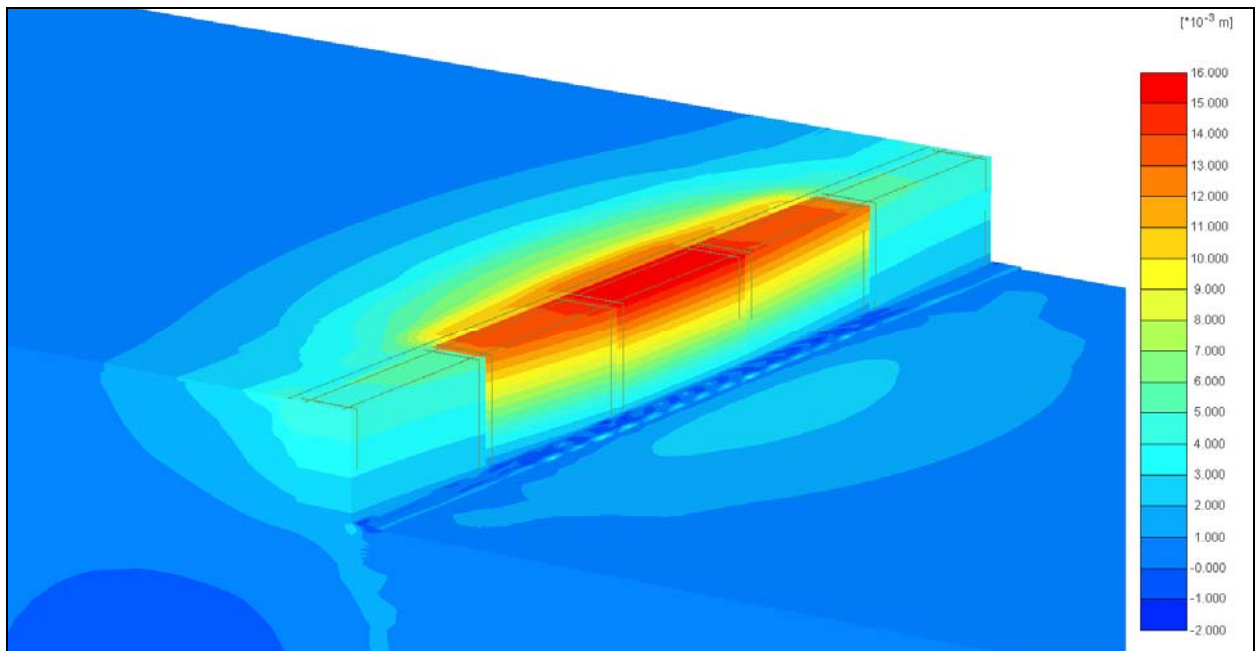


Figura 81. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa sobre los 3 cajones centrales.

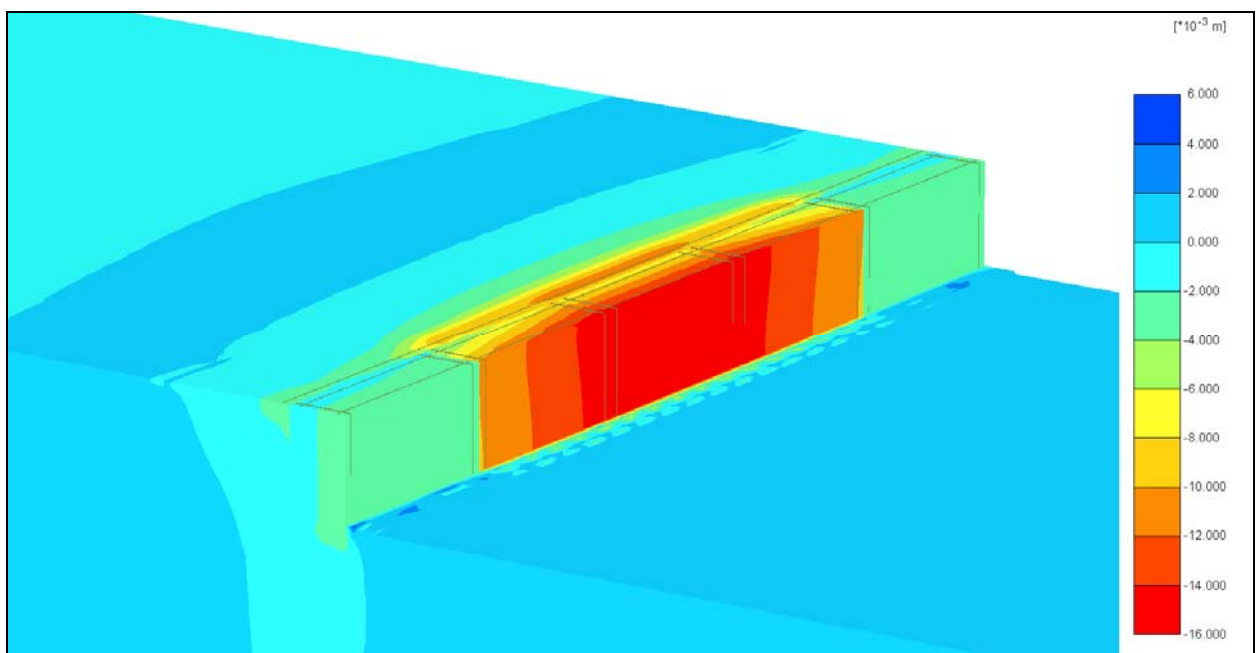


Figura 82. Desplazamientos verticales (u_y) debidos a la carga de la grúa sobre los 3 cajones centrales.

Puede observarse de la Figura 81 y Figura 82 y Figura 69 el giro de los cajones adyacentes al central tanto en el plano z-y (en el caso de los desplazamientos verticales) como en el plano x-z (en el caso de los desplazamientos horizontales).

Como se ha realizado para las hipótesis anteriores se adjuntan a continuación los desplazamientos totales, verticales y horizontales para una sección longitudinal al muelle por el centro de los cajones.

En la Figura 83 siguiente se muestran los desplazamientos totales tras las fases de aplicación de las cargas mediante proceso no drenado.

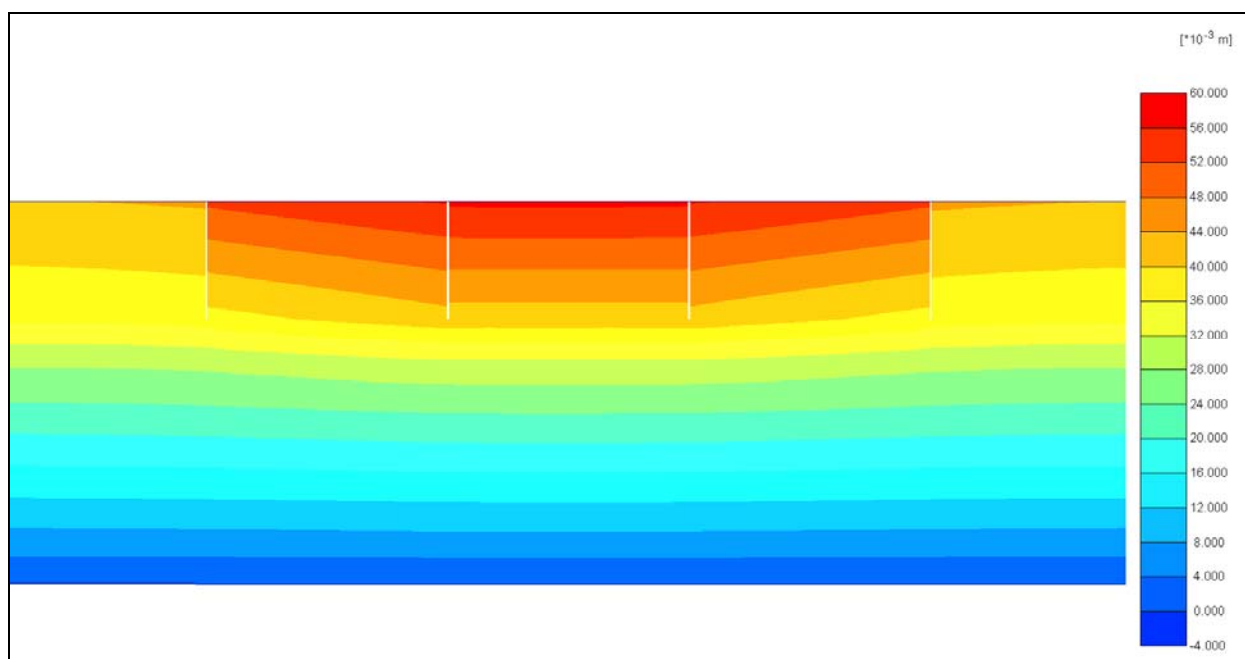


Figura 83. Desplazamientos totales tras aplicación de cargas mediante proceso no drenado.

En la Figura 84 y Figura 85 se muestra la variación de los desplazamientos horizontales (u_x) y los desplazamientos verticales (u_y) en los cajones y el terreno debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m) en una sección longitudinal al muelle. En dichas figuras se puede observar el efecto que tiene la carga sobre los tres cajones centrales del modelo en los cajones adyacentes.

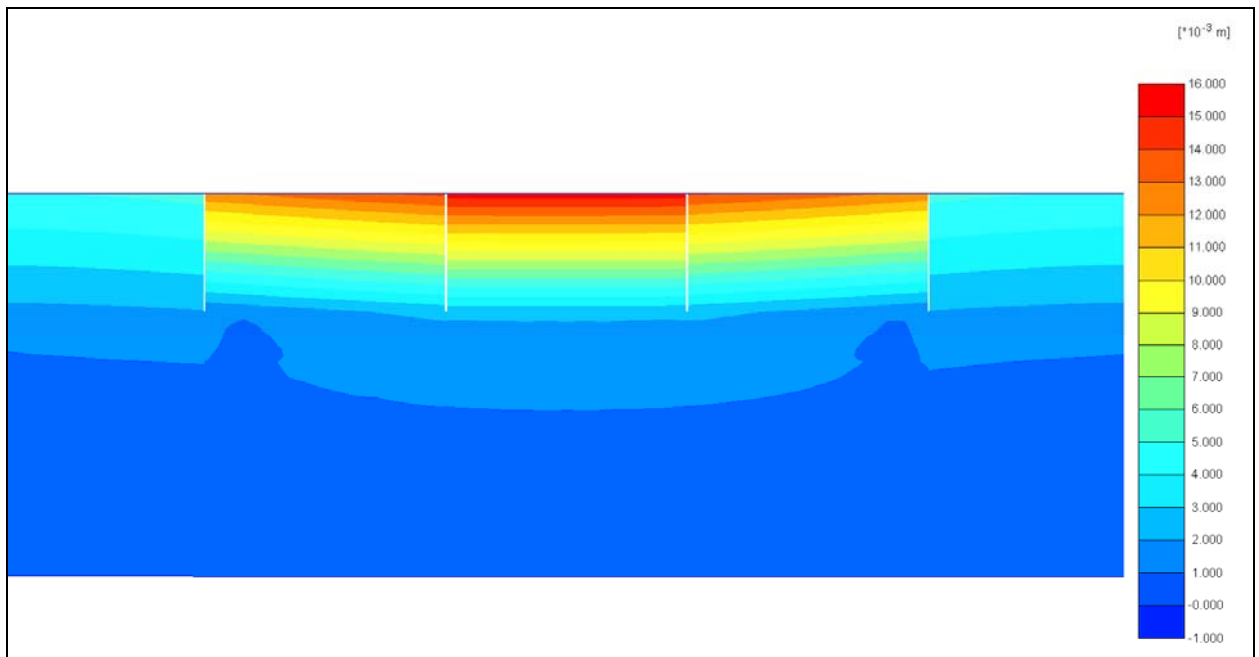


Figura 84. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa sobre los tres cajones centrales en fase de servicio (350 kN/m).

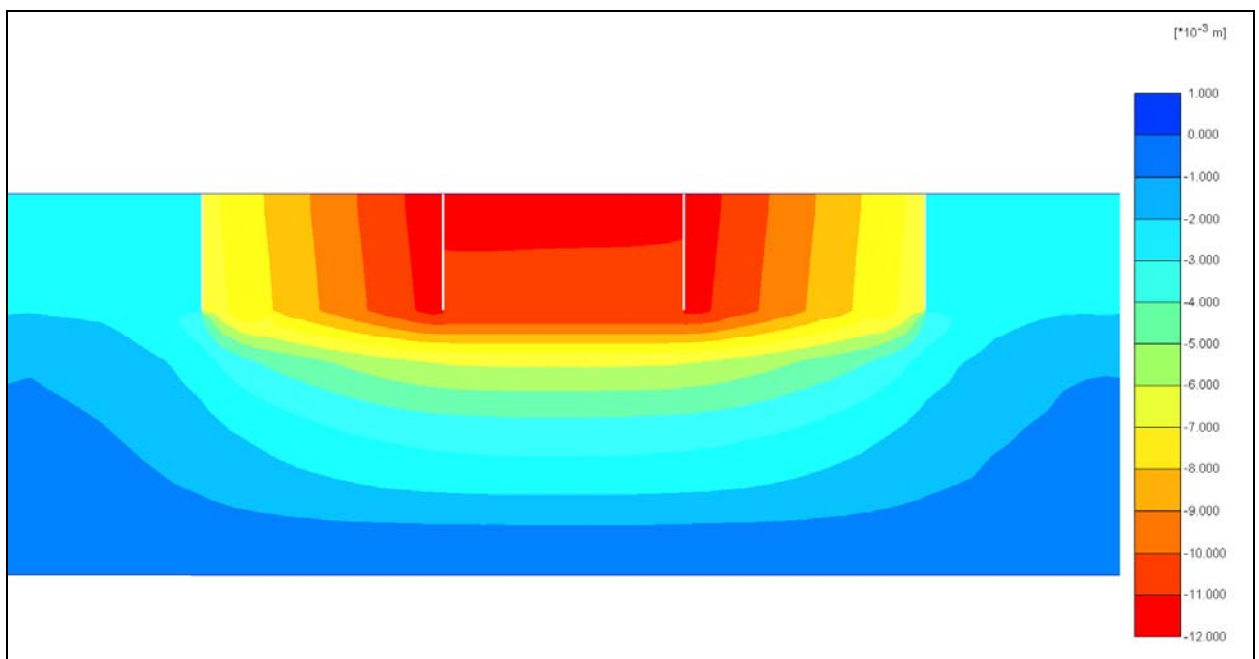


Figura 85. Desplazamientos horizontales (u_y) debidos a la carga de la grúa sobre los tres cajones centrales en fase de servicio (350 kN/m).

En la Figura 86 puede observarse el incremento de tensiones al pie de los tres cajones que provoca la aplicación de la carga de la grúa.

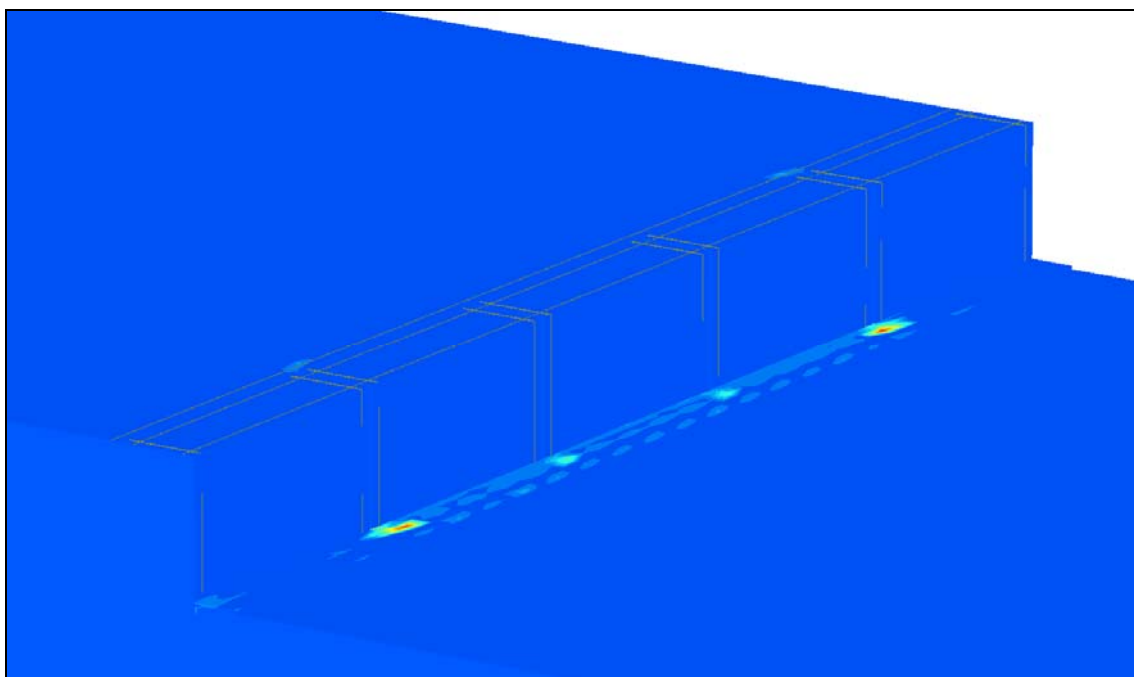


Figura 86. Incremento de deformaciones de corte debidas a la aplicación de la carga de grúa sobre los tres cajones.

En este caso el corte se ha realizado como en la Hipótesis 1, por el centro del modelo por considerarse la sección más desfavorable. En la Figura 87 se muestra el corte (A-A*) realizado.

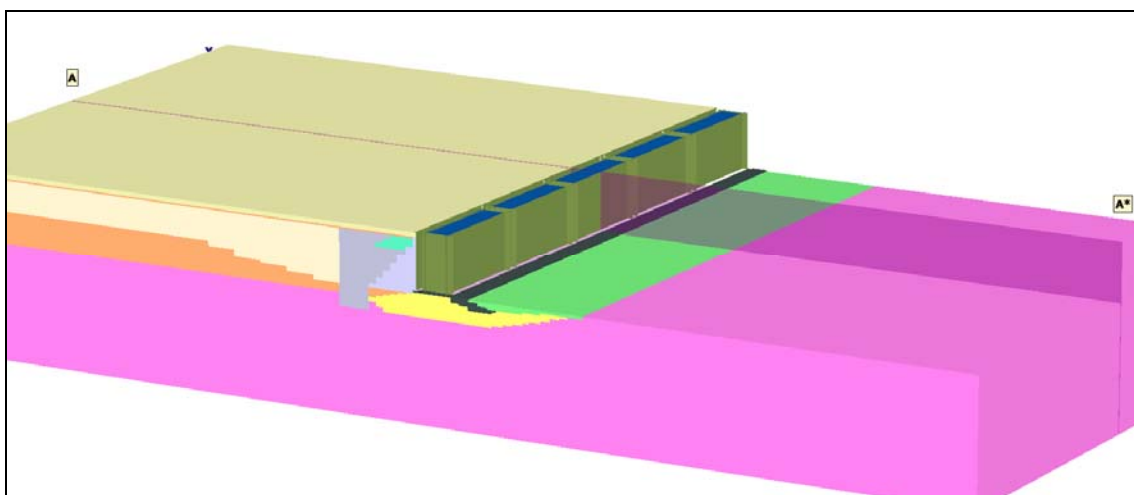


Figura 87. Corte realizado en el centro del modelo para la determinación de desplazamientos y tensiones.

De la figura siguiente puede observarse, aparte de los desplazamientos totales sufridos por el cajón central del modelo y el relleno, la interacción del terreno con el cajón.

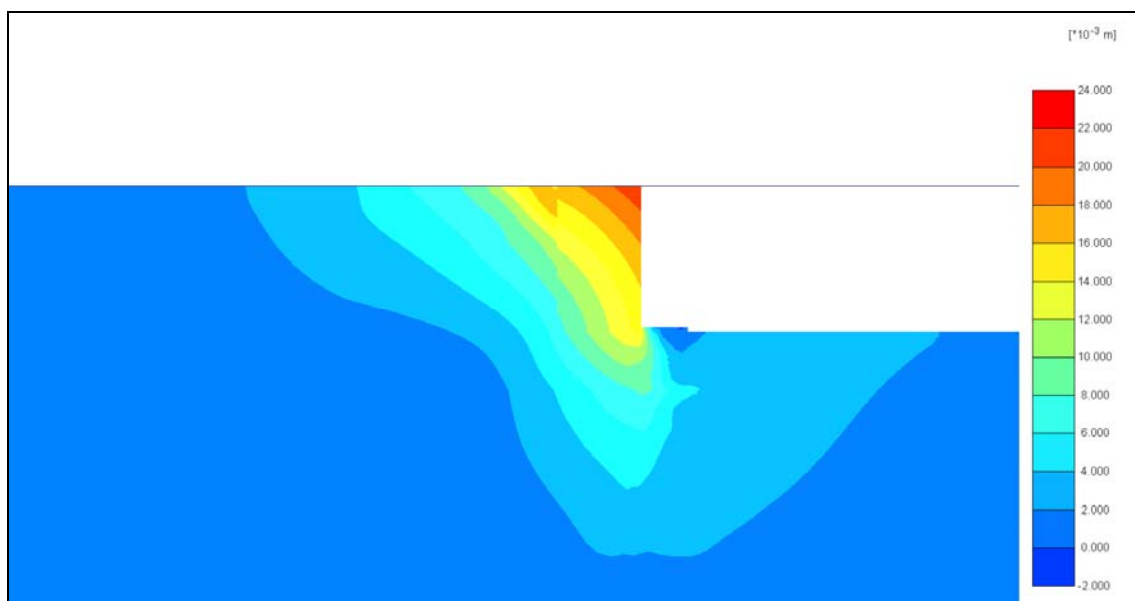


Figura 88. Desplazamientos totales (u_y) debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m).

Puede observarse de los desplazamientos totales obtenidos que la distribución es muy similar a la obtenida en la Hipótesis 1 (carga de grúa sobre cajón central), excepto en magnitud. El desplazamiento máximo estimado obtenido en la Hipótesis 3 (carga de grúa sobre los tres cajones centrales) es de 2,2 cm, frente a los 1,4 cm obtenidos en la Hip. 1.

Se adjuntan como para las hipótesis anteriores, los desplazamientos tanto verticales como horizontales en el terreno de trasdós y en el cajón para la sección (A-A*) considerada.

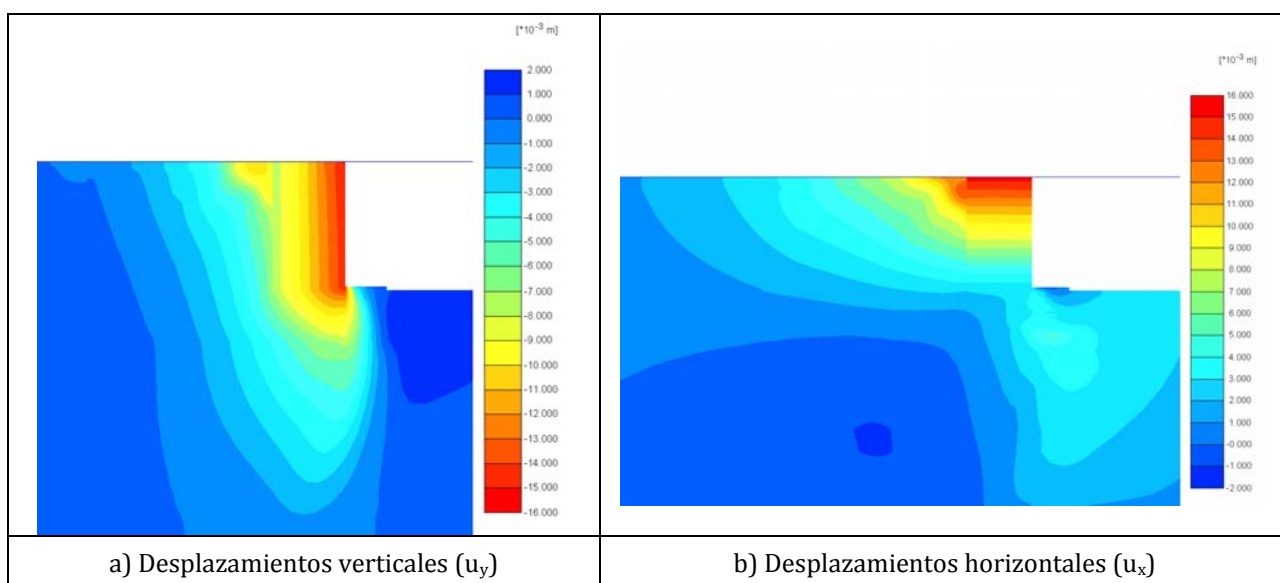


Figura 89. Desplazamientos verticales (u_y) y horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa.

Se adjunta a continuación la figura donde se muestran las direcciones principales de deformación y donde se puede observar la concentración de tensiones en el pie del muelle debida a la carga de la grúa sobre los 3 cajones centrales.

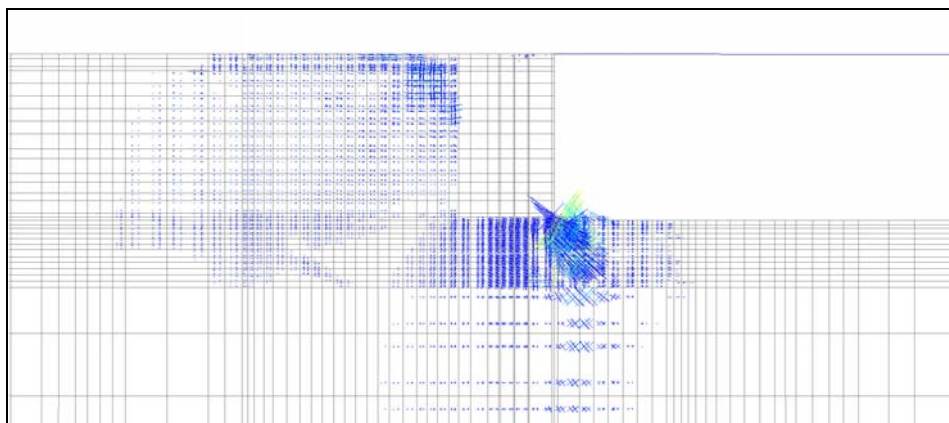


Figura 90. Direcciones principales de deformación debidas a la aplicación de la grúa sobre los 3 cajones centrales.

Obtención del Factor de Seguridad

Tal como se ha realizado en las hipótesis anteriores, la obtención del FS se ha basado en el método de estudio del valor alcanzado del multiplicador ΣM_{stage} . En este caso, se ha colocado sobre el cajón una carga de 2.450 kN/m.

En la figura siguiente se adjunta la malla deformada tras la aplicación de la carga sobre ambos cajones.

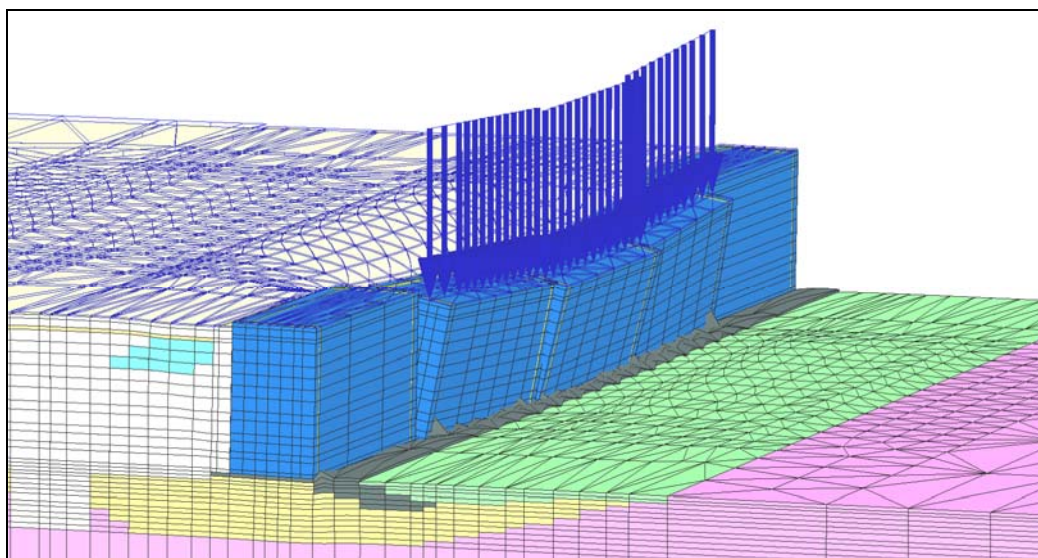


Figura 91. Malla deformada tras aplicación de carga lineal sobre los tres cajones centrales del muelle.

Para la carga aplicada sobre los dos cajones (2.450 kN/m), se ha alcanzado un valor del multiplicador ΣM_{stage} de 0,876.

Por lo tanto, la carga última soportada por el terreno sería de 2.146 kN/m. Considerando que el FS equivale a la carga última que soportará la estructura dividido por la carga aplicada (en este caso 350 kN/m), el FS obtenido para la Hipótesis 3 (carga de grúa sobre los tres cajones centrales) es de **FS = 6,13**.

6.2.4 RESULTADOS HIPÓTESIS 4 (CARGA 5 CAJONES)

En esta hipótesis la carga de grúa se aplica en los cinco cajones que conforman la alineación de muelle del modelo realizado. En la presente hipótesis el giro de los cajones queda totalmente impedido por las condiciones de contorno y la distribución de las cargas, pudiéndola asimilar a un caso de deformación plana. Como en las hipótesis anteriores, la carga lineal que equivale a la carga de grúa sobre cajón es de 350 kN/m.

Los desplazamientos totales obtenidos tanto en el terreno de trasdós como en los cajones se muestran en la Figura 102. Estos desplazamientos responden al final de las fases de cargas de servicio (proceso no drenado) aplicadas.

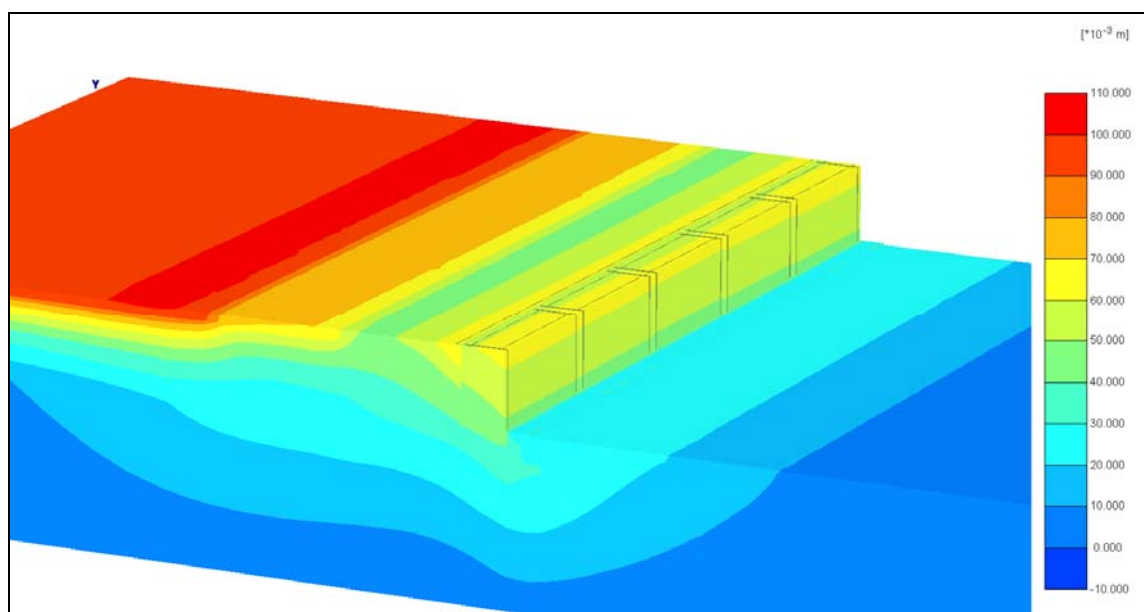


Figura 92. Desplazamientos totales resultantes de la aplicación de las cargas sobre los cinco cajones.

En la siguiente figura se muestran los desplazamientos totales tras fase de aplicación sobre los cinco cajones que conforman el modelo de la carga de grúa considerada (350 kN/m).

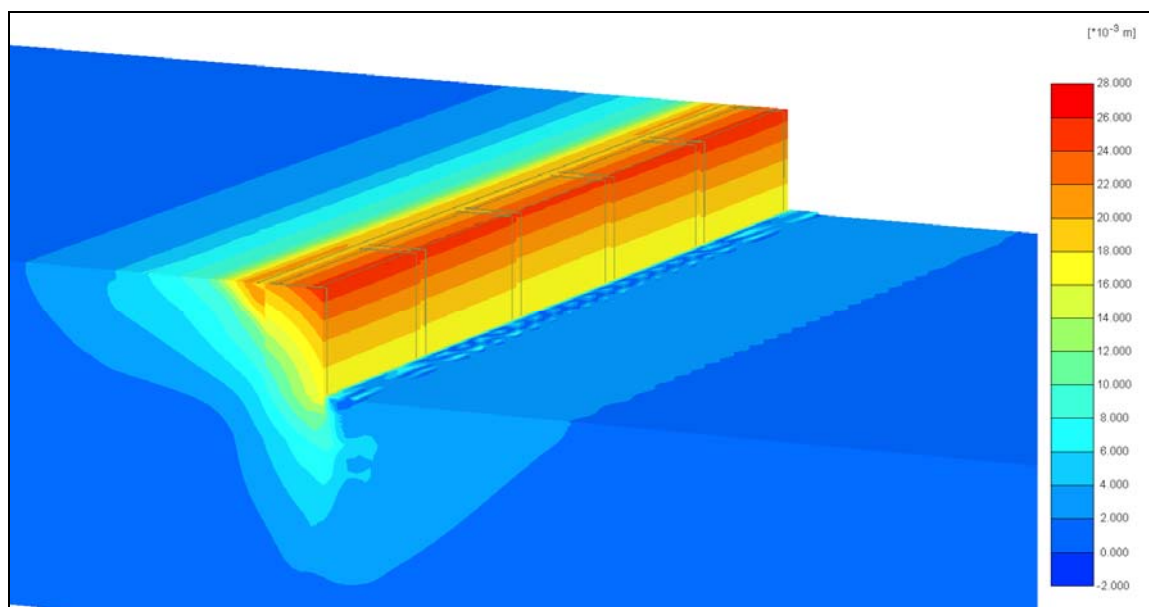


Figura 93. Desplazamientos totales debidos a la carga de la grúa (350 kN/m) sobre los cinco cajones.

Se muestra en las figuras siguientes el comportamiento de los cajones que conforma la alineación del muelle y del terreno adyacente tras la aplicación de dicha carga.

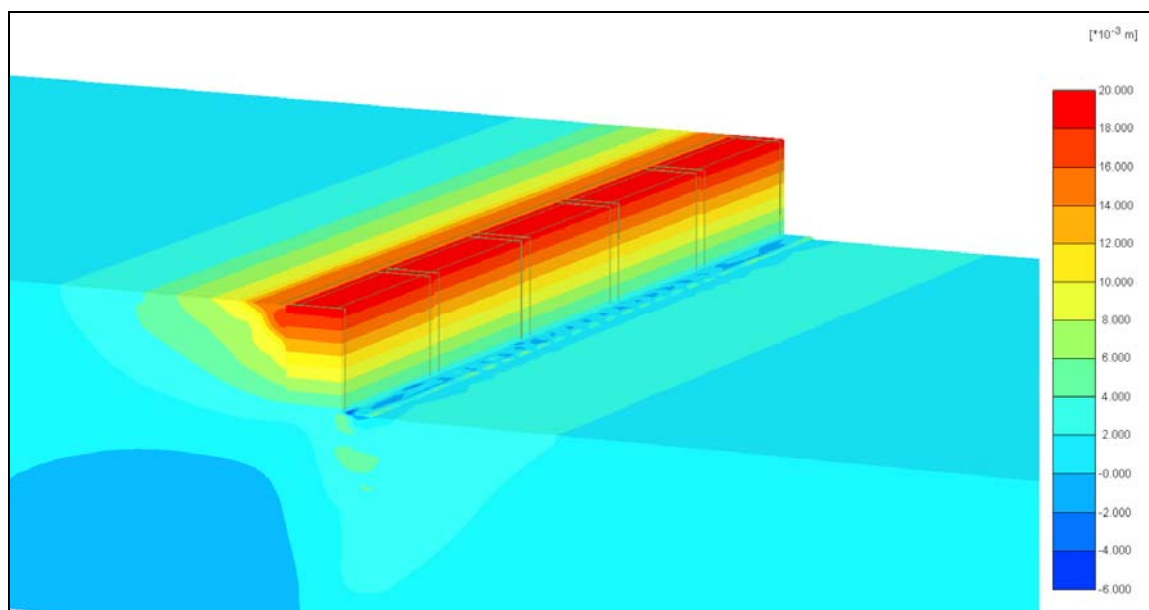


Figura 94. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa sobre los 5 cajones.

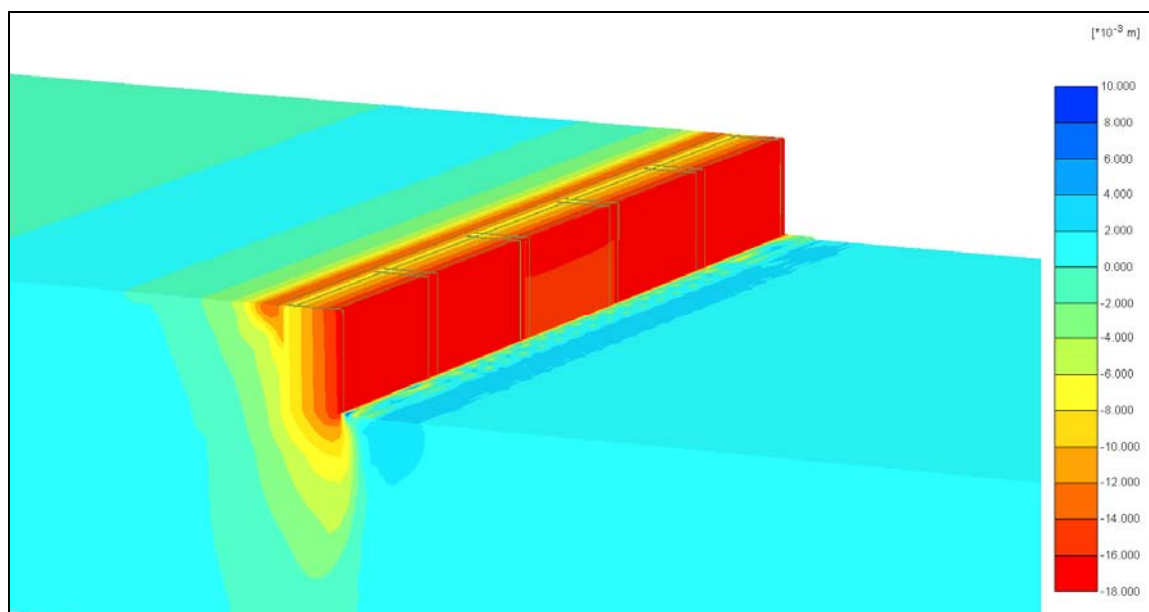


Figura 95. Desplazamientos verticales (u_y) debidos a la carga de la grúa sobre los 5 cajones.

Como se ha realizado para las hipótesis anteriores se adjuntan a continuación los desplazamientos totales, verticales y horizontales para una sección longitudinal al muelle por el centro de los cajones.

En la Figura 96 siguiente se muestran los desplazamientos totales tras las fases de aplicación de las cargas mediante proceso no drenado.

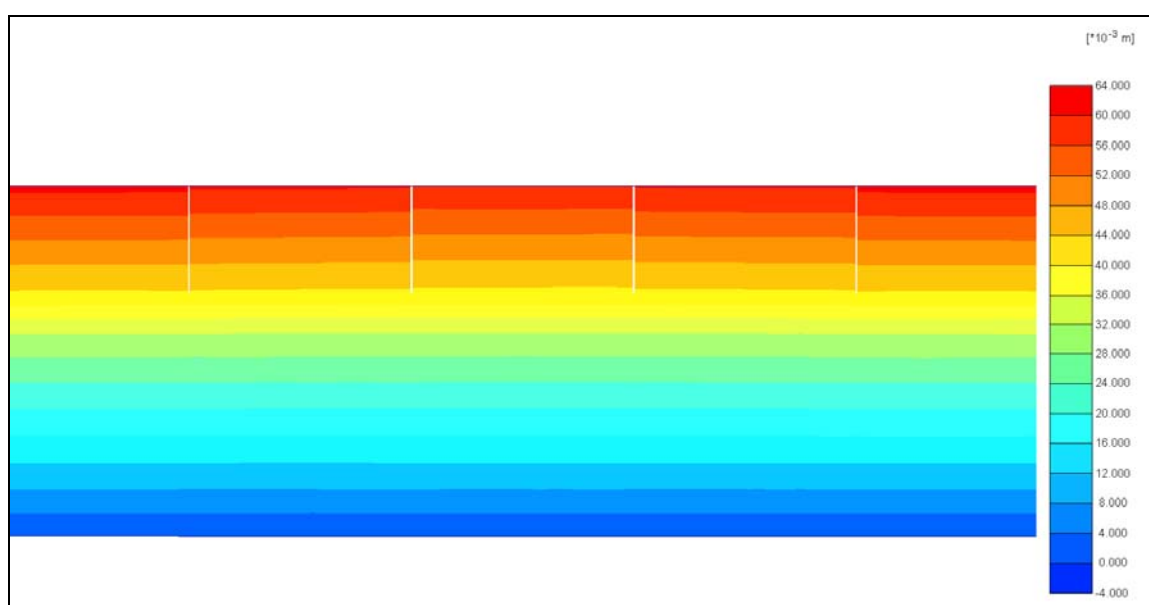


Figura 96. Desplazamientos totales tras aplicación de cargas mediante proceso no drenado.

En la Figura 97 y Figura 98 se muestra la variación de los desplazamientos horizontales (u_x) y los desplazamientos verticales (u_y) en los cajones y el terreno debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (350 kN/m) en una sección longitudinal al muelle. En dichas figuras puede observarse el comportamiento de deformación plana al cargar todos los cajones que conforman el modelo.

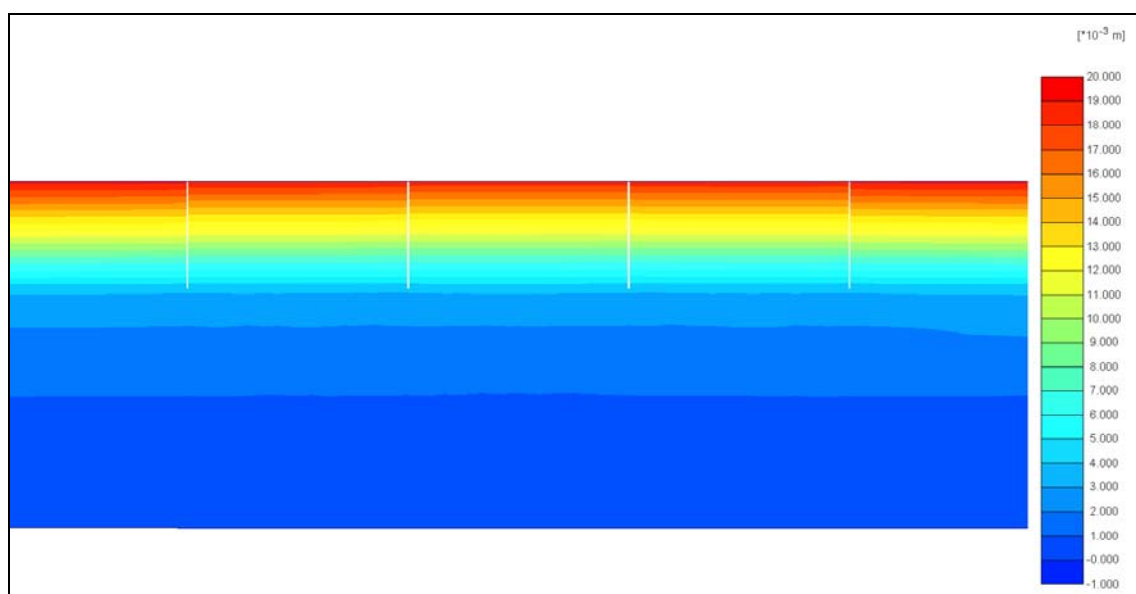


Figura 97. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa sobre los tres cajones centrales en fase de servicio (350 kN/m).

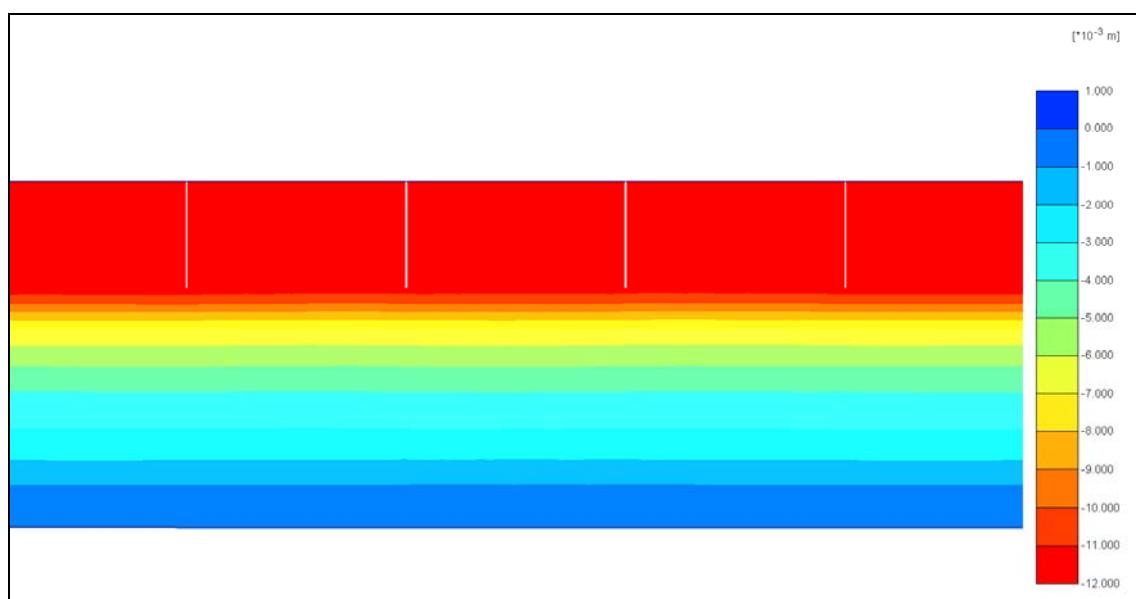


Figura 98. Desplazamientos verticales (u_y) debidos a la carga de la grúa sobre los tres cajones centrales en fase de servicio (350 kN/m).

En la Figura 99 puede observarse el incremento de tensiones al pie de los cinco cajones del modelo que provoca la aplicación de la carga de la grúa.

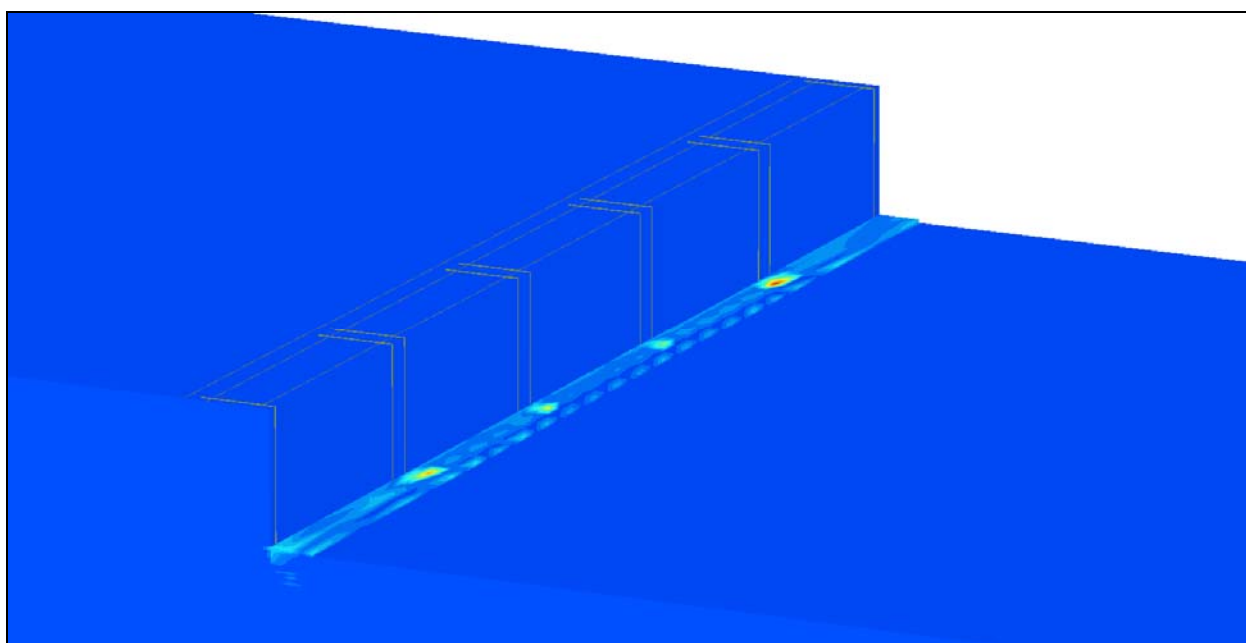


Figura 99. Incremento de deformaciones de corte debidas a la aplicación de la carga de grúa sobre los 5 cajones.

Se ha realizado un corte por el centro del modelo para el análisis en detalle de los desplazamientos totales, verticales y horizontales sufridos por los cajones (considerados en este caso iguales para todas las secciones del modelo).

De la Figura 100 puede observarse que los desplazamientos máximos totales debidos a la aplicación de la carga de la grúa se estiman de 2,5 cm. Dichos desplazamientos, como en las hipótesis anteriores, se darán en coronación del cajón, en su extremo superior lado mar.

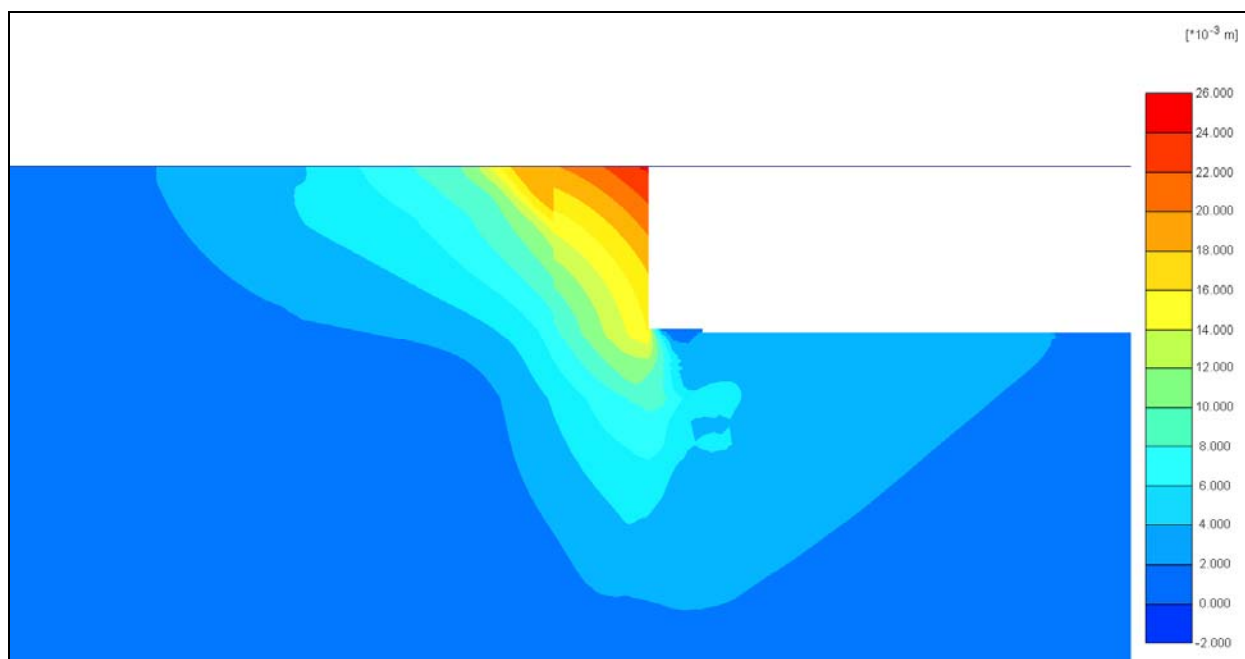


Figura 100. Incremento de deformaciones de corte debidas a la aplicación de la carga de grúa sobre los 5 cajones.

Puede observarse de la Figura 100 y Figura 101 que los desplazamientos obtenidos son prácticamente idénticos a los obtenidos en los modelos realizados en la calibración. De la Figura 101 se desprende que los desplazamientos verticales máximos estimados serán de 0,28 cm, y los horizontales de 1,9 cm.

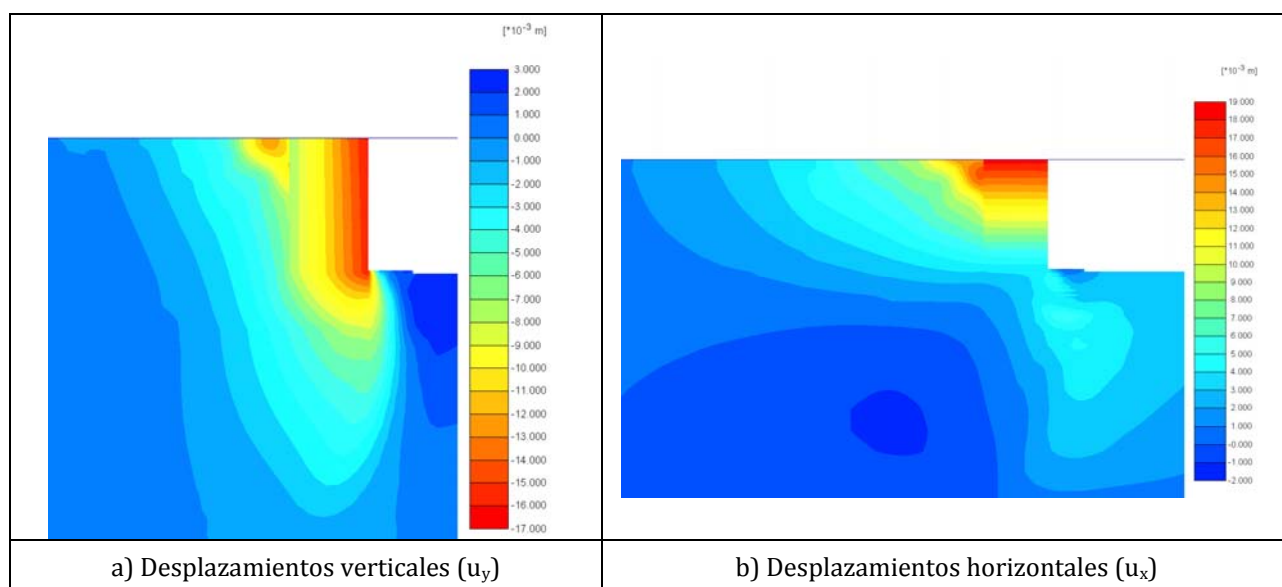


Figura 101. Desplazamientos verticales (u_y) y horizontales (u_x) debidos a la carga de la grúa.

Obtención del Factor de Seguridad

Para la obtención del FS se ha analizado el valor alcanzado del multiplicador ΣM_{stage} con la aplicación de una carga lineal sobre los 5 cajones del modelo de 3.500 kN/m.

En la figura siguiente se adjunta la malla deformada tras la aplicación de la carga sobre los cajones.

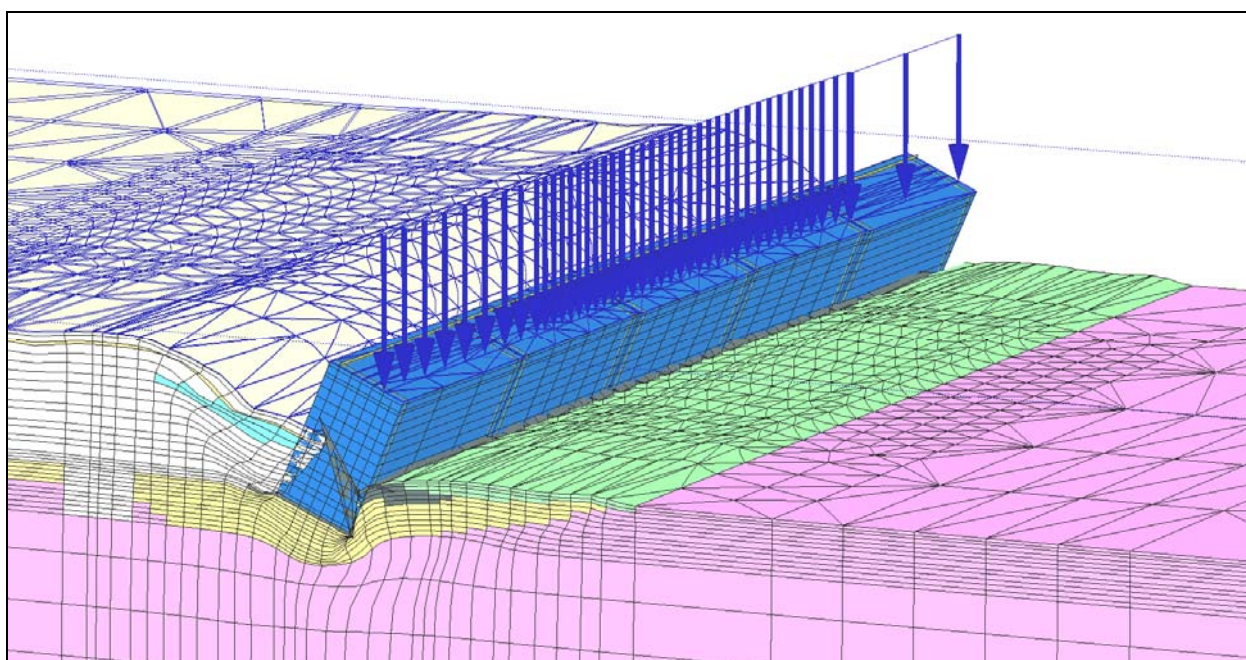


Figura 102. Malla deformada tras aplicación de carga lineal sobre los cinco cajones del muelle modelizado.

Para la carga aplicada sobre los dos cajones (3.500 kN/m), se ha alcanzado un valor del multiplicador ΣM_{stage} de 0,489.

Por lo tanto, la carga última soportada por el terreno sería de 1.711,5 kN/m. Considerando que el FS equivale a la carga última que soportará la estructura dividido por la carga aplicada (350 kN/m), el FS obtenido para la Hipótesis 4 (carga de grúa sobre los cinco cajones del modelo que conforman la alineación de muelle) es de **FS = 4,9**.

6.3 HIPÓTESIS DE CARGA EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA GRÚA

En el apartado anterior se ha comprobado el efecto tridimensional de las cargas en función del número de cajones cargados con una determinada carga de grúa, así como la variación de los FS obtenidos en cada una de las hipótesis realizadas. Para dicho análisis se ha considerado una carga lineal repartida en toda la eslora del cajón (40,0 m) de 350 kN/m, que respondía a la carga de grúa transmitida sobre el muelle por las dos patas delanteras de la grúa considerada ($14.000 \text{ kN} / 40 \text{ m} = 350 \text{ kN/m}$), considerando una única grúa por cajón.

Sin embargo, por la propia geometría de la grúa, pueden considerarse diferentes hipótesis de carga sobre los cajones. Para dicho análisis se ha considerado el mismo tipo de grúa que en el apartado anterior (grúas de 4 patas con una carga en servicio por pata de 7.000 kN, considerando que el muelle recibirá únicamente la carga transmitida por las dos patas delanteras de la grúa, esto significa una carga de 14.000 kN), pero teniendo en cuenta que un único cajón puede albergar más de una grúa.

Para el análisis que se llevará a cabo a continuación, se han supuesto las posibles combinaciones de carga de grúa sobre los cajones en función de la geometría de ésta, que se resumen en la tabla siguiente:

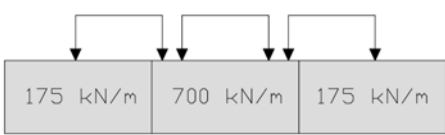
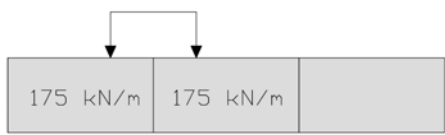
HIPÓTESIS	GEOMETRÍA DE LAS CARGAS
Hipótesis 5	 <p>Carga sobre 3 cajones centrales (175 – 700 – 175 kN/m)</p>
Hipótesis 6	 <p>Carga sobre 2 cajones consecutivos (175 – 175 kN/m)</p>

Tabla 22. Hipótesis de carga consideradas en función de la geometría de la grúa.

A continuación se realiza un estudio del FS en función de las posibles cargas de grúa sobre los cajones en función de la geometría de ésta. En las siguientes figuras se muestran los modelos analizados para el estudio del FS en función de las diferentes hipótesis consideradas.

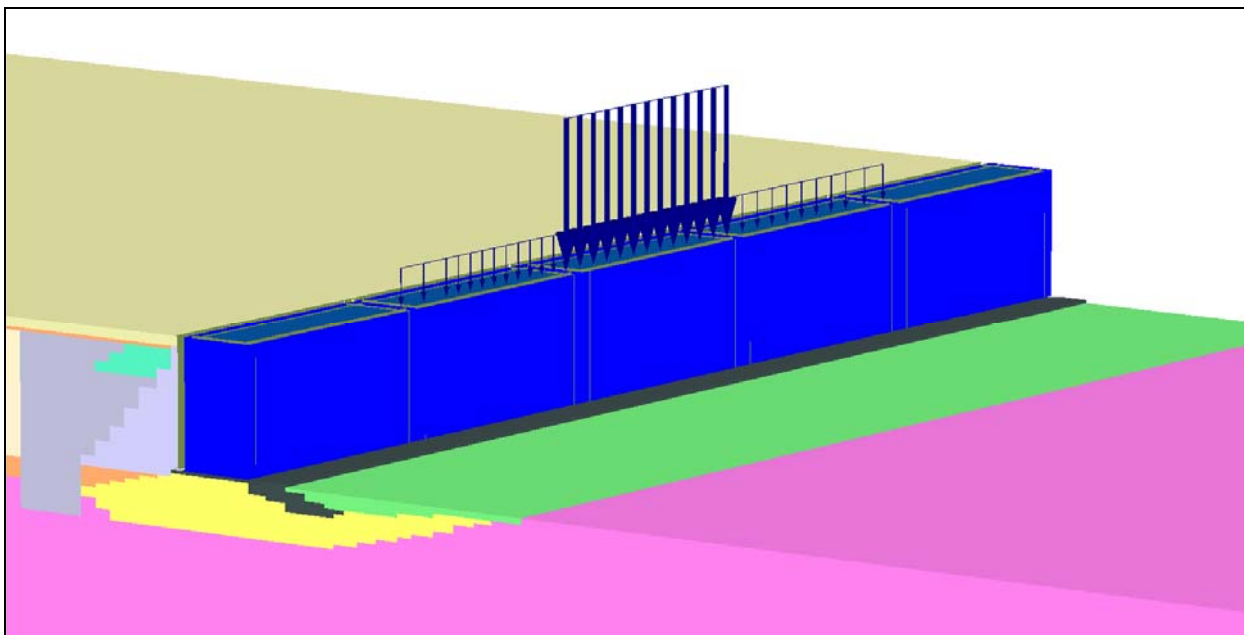


Figura 103. Modelo con carga de 2 grúas sobre el cajón central y 0,5 grúa sobre cajones adyacentes a éste.

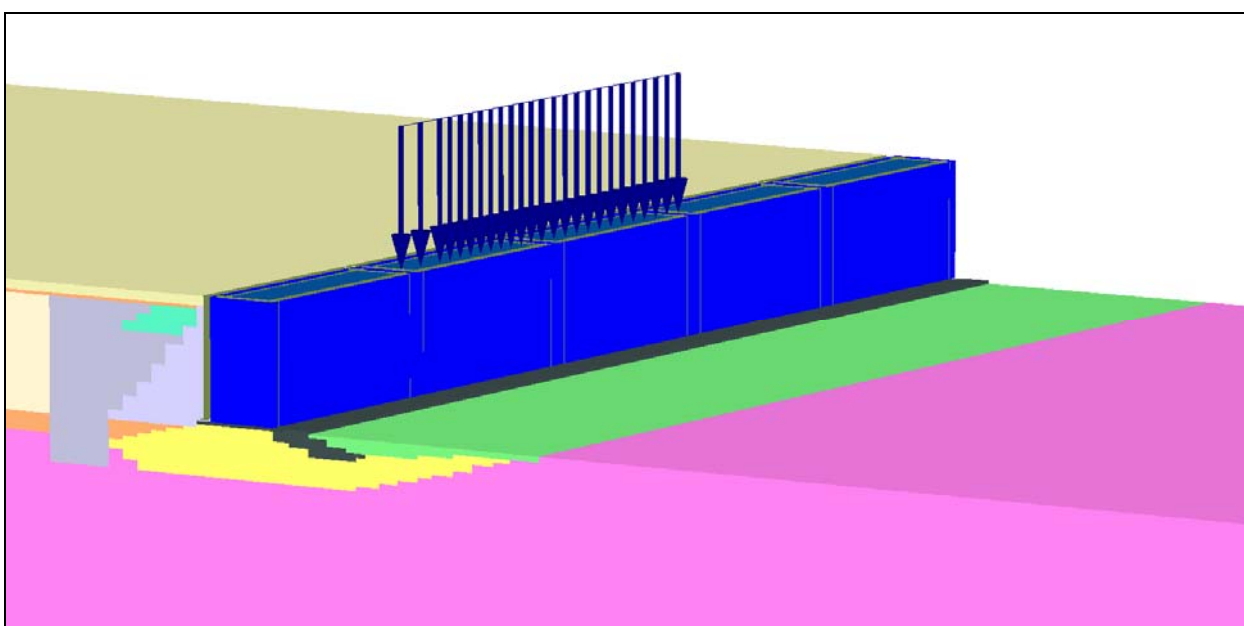


Figura 104. Modelo con carga de 0,5 grúa sobre dos cajones.

6.3.1 RESULTADOS HIPÓTESIS 5 (2 GRÚAS CAJÓN CENTRAL - 0,5 CAJONES ADYACENTES)

Tal como se extrae de la Tabla 22, en este caso se ha considerado una carga lineal de 700 kN/m sobre el cajón central del modelo y de 175 sobre los cajones adyacentes a éste para tener en cuenta la hipótesis de que puede caber la carga de dos grúas sobre un mismo cajón, reposando las otras patas de dichas grúas sobre los cajones adyacentes.

En la figura Figura 105 se pueden observar los desplazamientos totales en las fases consideradas no drenadas (aplicación de las cargas de servicio en el trasdós del muelle y carga de grúa).

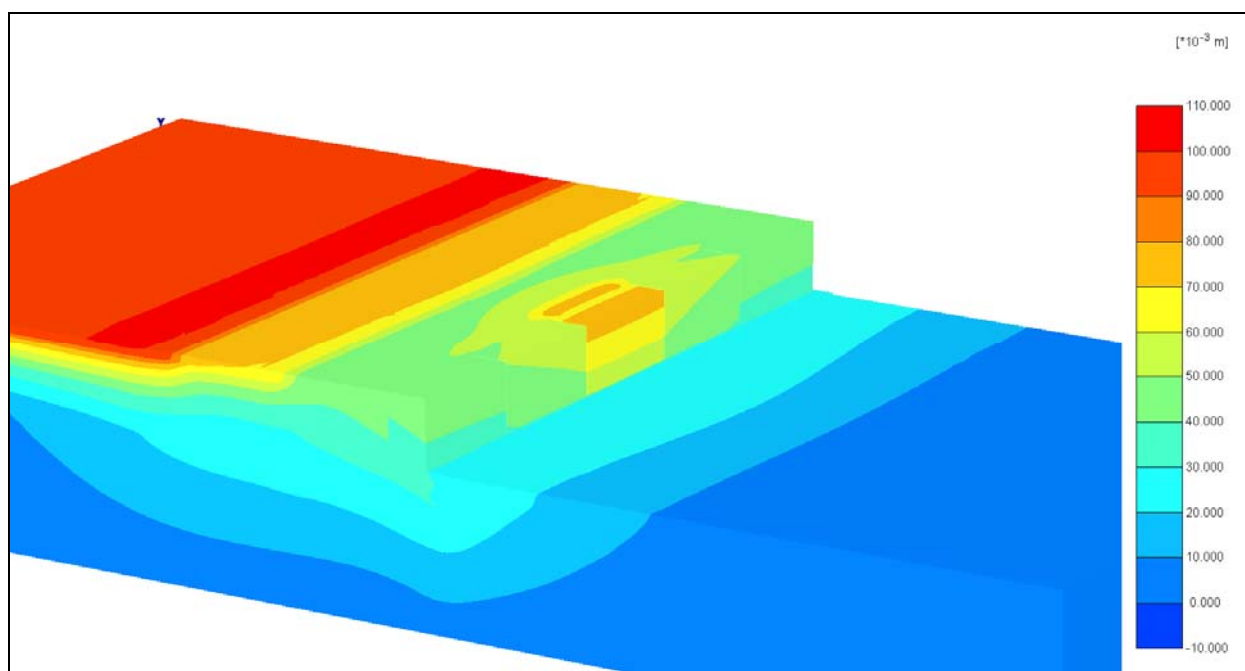


Figura 105. Desplazamientos totales tras la aplicación de las cargas en fase de servicio (caso no drenado).

Se muestran en la siguiente figura los desplazamientos totales tras la aplicación sobre el cajón de la carga de grúa considerada en fase de servicio (350 kN/m). Puede observarse que los desplazamientos máximos totales estimados debidos a la carga de la grúa serán de 4,0 cm en coronación del cajón lado mar.

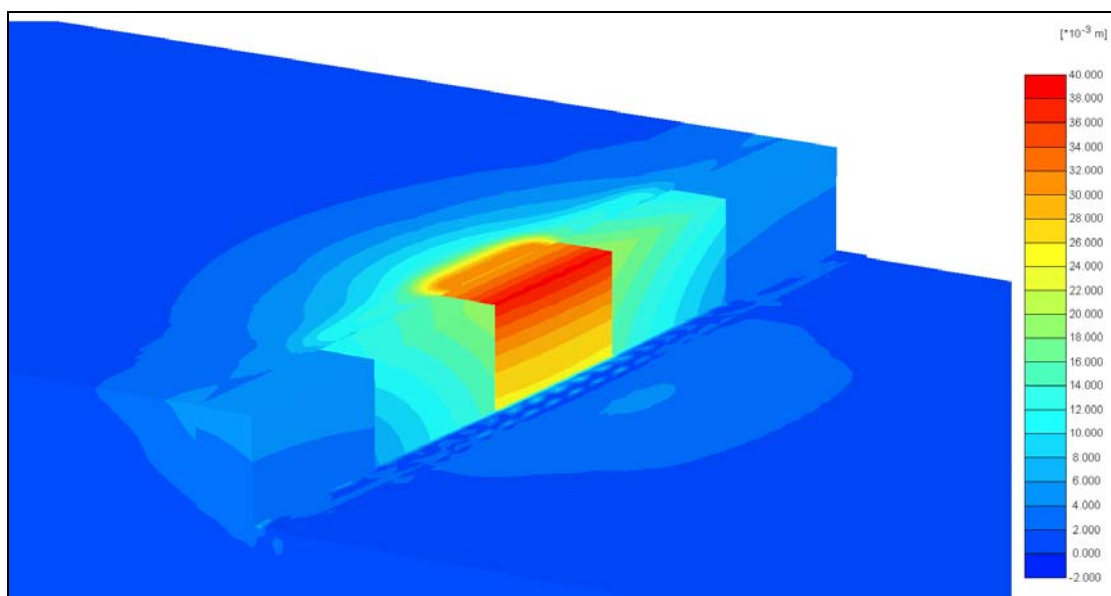


Figura 106. Desplazamientos totales debidos a las cargas de grúa durante la fase de servicio (700 kN/m sobre cajón central y 175 kN/m sobre los cajones adyacentes).

Dichos desplazamientos tendrán una componente vertical (hundimiento del cajón) y otra horizontal (vuelco rígido y vuelco plástico del cajón). Por lo tanto, se considera oportuno mostrar el comportamiento del cajón y del terreno adyacente en lo que tanto a desplazamientos verticales como horizontales se refiere. En las siguientes figuras se muestran dichos desplazamientos.

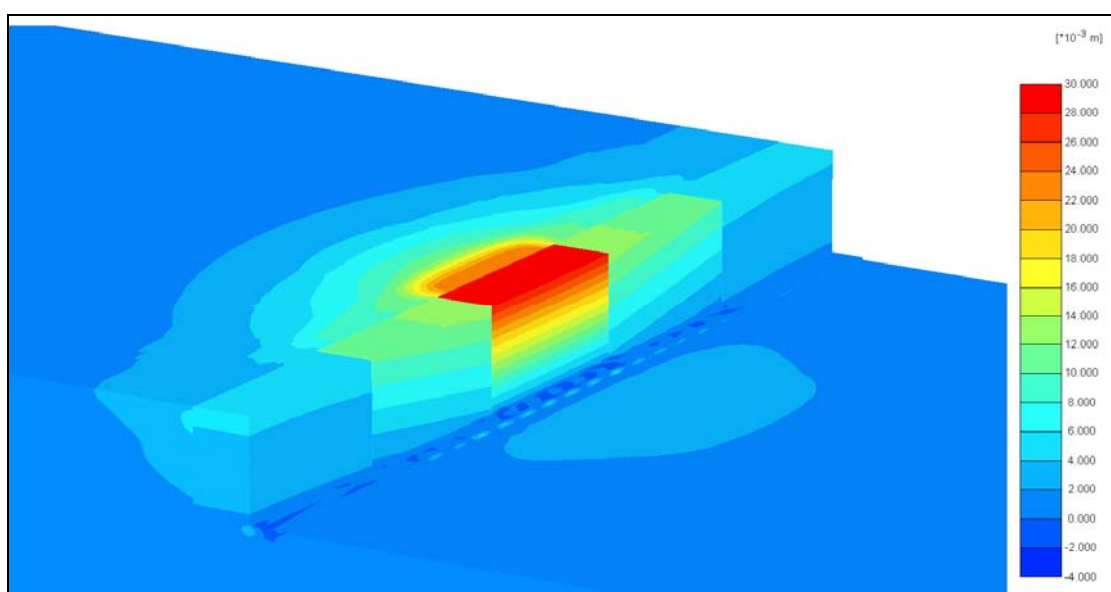


Figura 107. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a las cargas de grúa durante la fase de servicio (700 kN/m sobre cajón central y 175 kN/m sobre los cajones adyacentes).

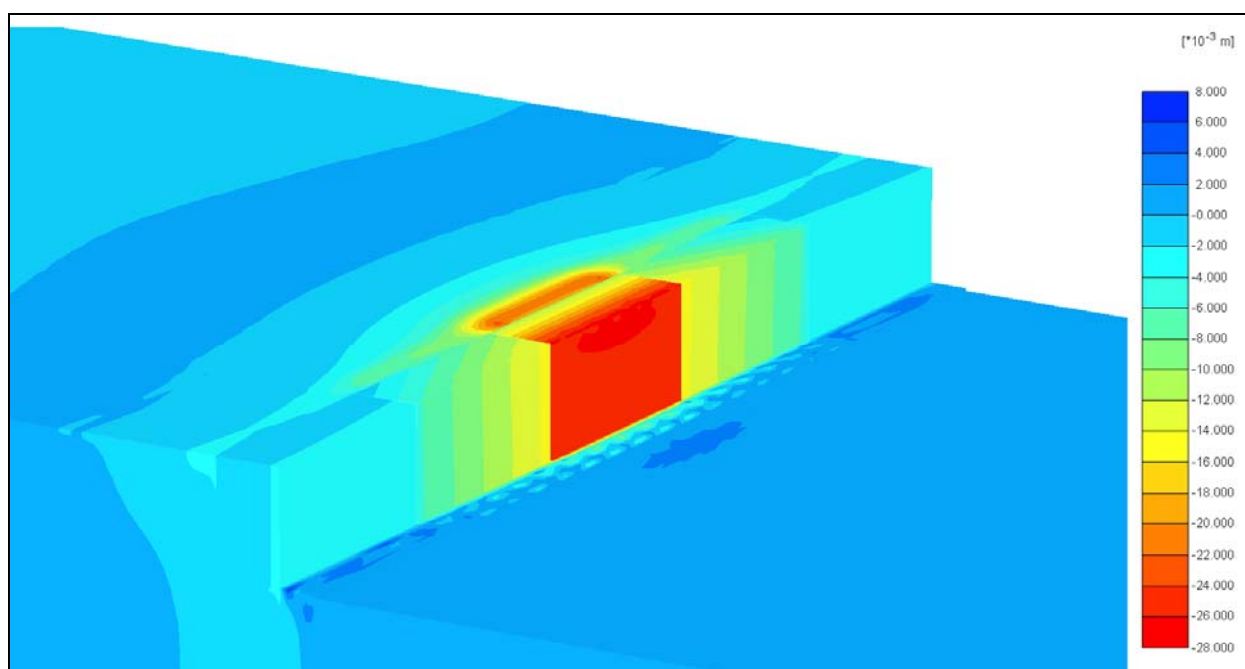


Figura 108. Desplazamientos verticales (u_y) debidos a las cargas de grúa durante la fase de servicio (700 kN/m sobre cajón central y 175 kN/m sobre los cajones adyacentes).

De la Figura 52 y Figura 53 puede observarse el comportamiento de los cajones como un sólido rígido, ya que las líneas tanto de desplazamientos verticales como de desplazamientos horizontales son paralelas en los cajones cargados. Puede observarse también el giro de los cajones adyacentes cargados con 175 kN/m al cargado con 700 kN/m tanto en el plano z-y (en el caso de los desplazamientos verticales) como en el plano x-z (en el caso de los desplazamientos horizontales).

Se ha realizado un corte por el centro de los cajones en el sentido longitudinal al muelle para estudiar cómo varían a lo largo de dicha sección los desplazamientos totales, verticales y horizontales en función de las cargas aplicadas. En la Figura 109 se muestra el corte (A-A*) realizado para la obtención de las mencionadas variables.

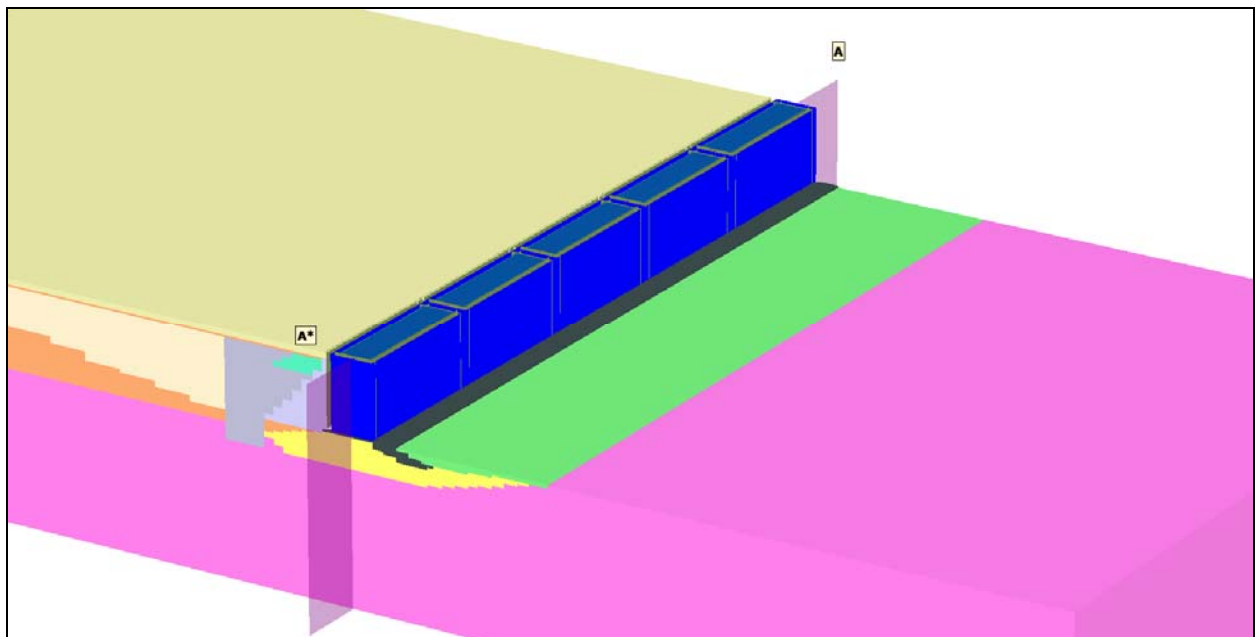


Figura 109. Sección realizada en sentido longitudinal al muelle.

En la figura siguiente se muestran los desplazamientos totales tras las fases de aplicación de las cargas mediante proceso no drenado.

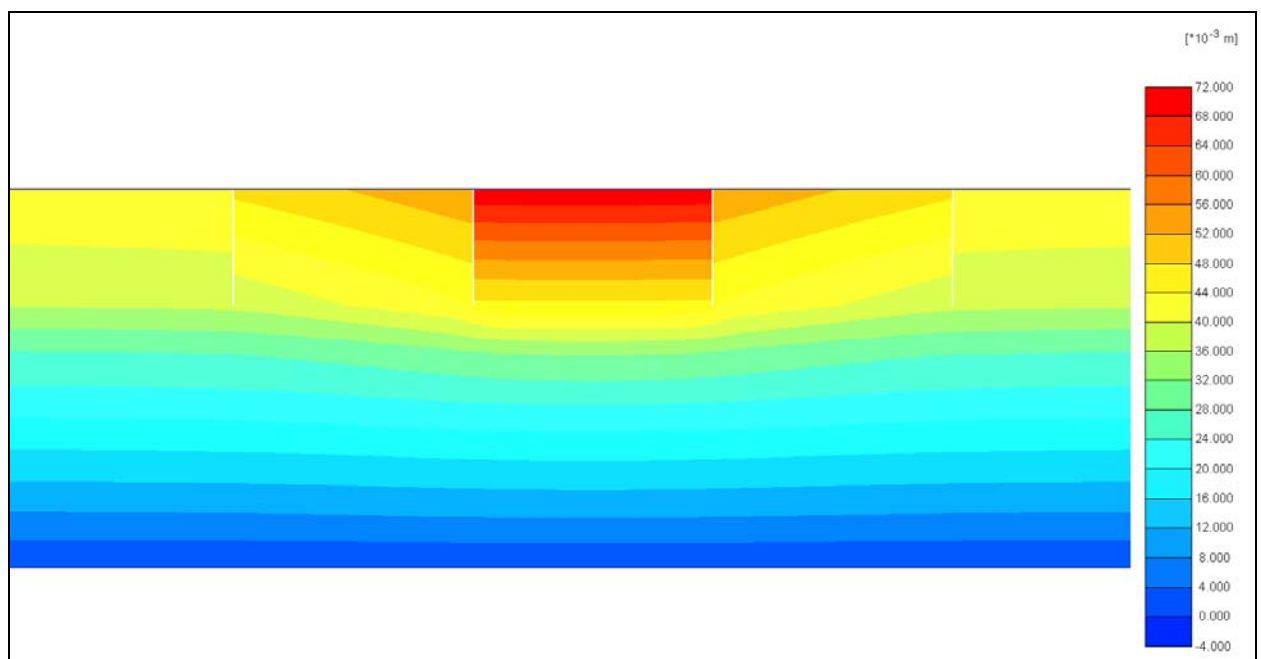


Figura 110. Desplazamientos totales tras aplicación de cargas mediante proceso no drenado.

En la Figura 111 y Figura 112 se muestra la variación de los desplazamientos horizontales (u_x) y los desplazamientos verticales (u_y) en los cajones y el terreno debidos a la carga de la grúa en fase de servicio (700 kN/m sobre cajón central y 175 kN/m sobre los cajones adyacentes) en una sección longitudinal al muelle.

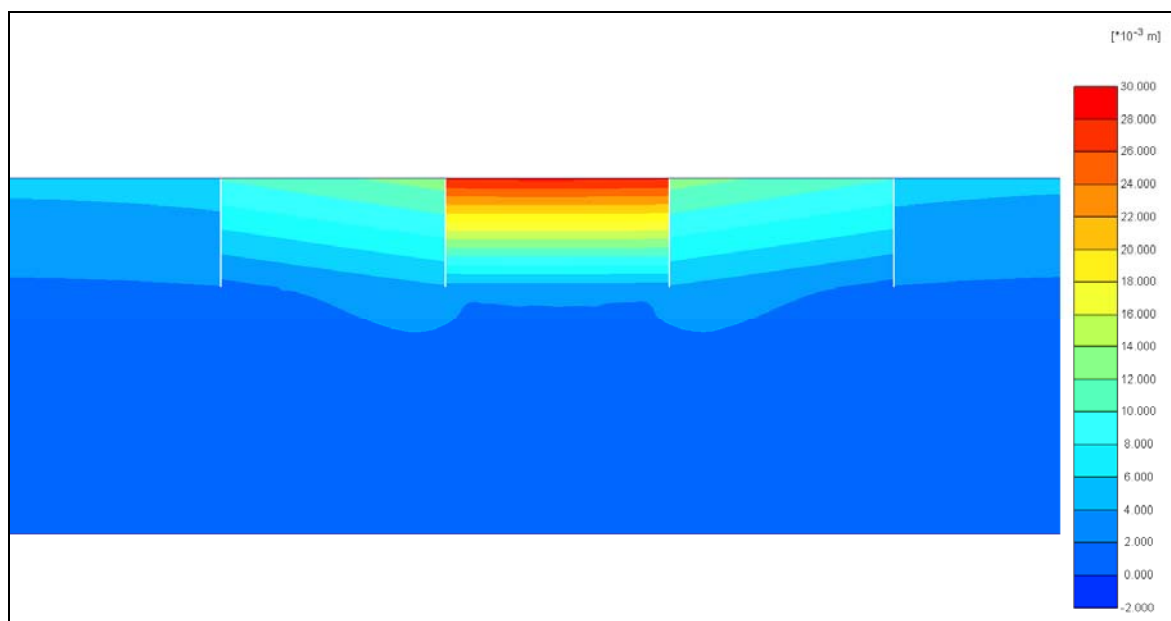


Figura 111. Desplazamientos horizontales (u_x) (700 kN/m sobre cajón central y 175 kN/m sobre los cajones adyacentes).

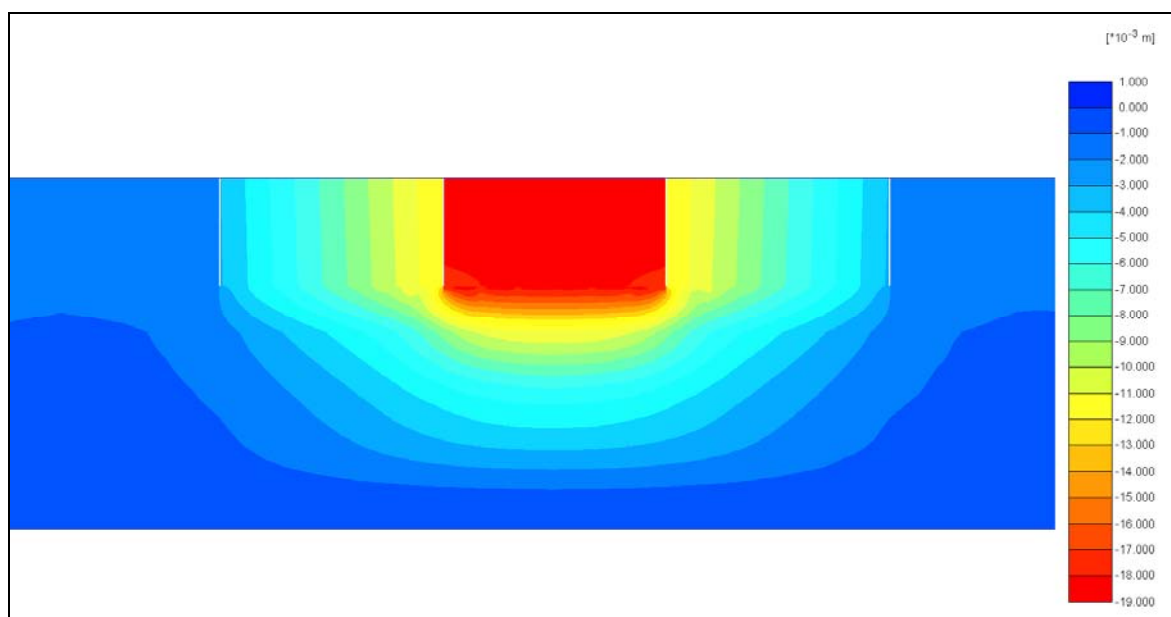


Figura 112. Desplazamientos horizontales (u_y) (700 kN/m sobre cajón central y 175 kN/m sobre los cajones adyacentes).

La aplicación de la carga de las grúas supone un incremento de tensiones importante al pie de los cajones que provoca la plastificación del terreno en dicho punto. En la Figura 113 puede observarse el incremento de tensiones en el terreno debidas a la aplicación de las grúas.

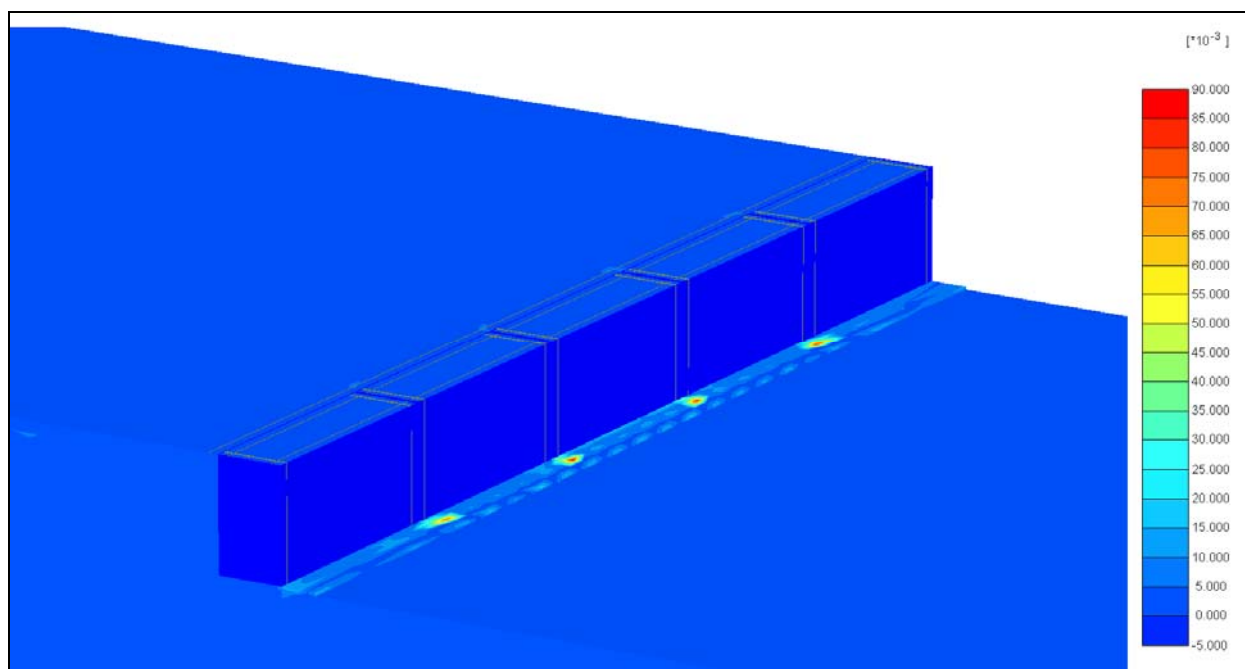


Figura 113. Incremento de deformaciones de corte debidas a la aplicación de la carga de las grúas.

Se han realizado dos secciones transversales al muelle, una por el centro del cajón cargado con una carga lineal de 700 kN/m y otra por el centro de uno de los cajones cargados con una carga lineal de 175 kN/m para el estudio de diferentes variables como serían los desplazamientos totales, verticales y horizontales en sección, el exceso de presión de poro generada por la aplicación de las grúas y los incrementos tensionales debidos a la aplicación de éstas al pie del muelle. En la Figura 114 se muestran los cortes (A-A*) y (B-B*) realizados para la obtención de las mencionadas variables.

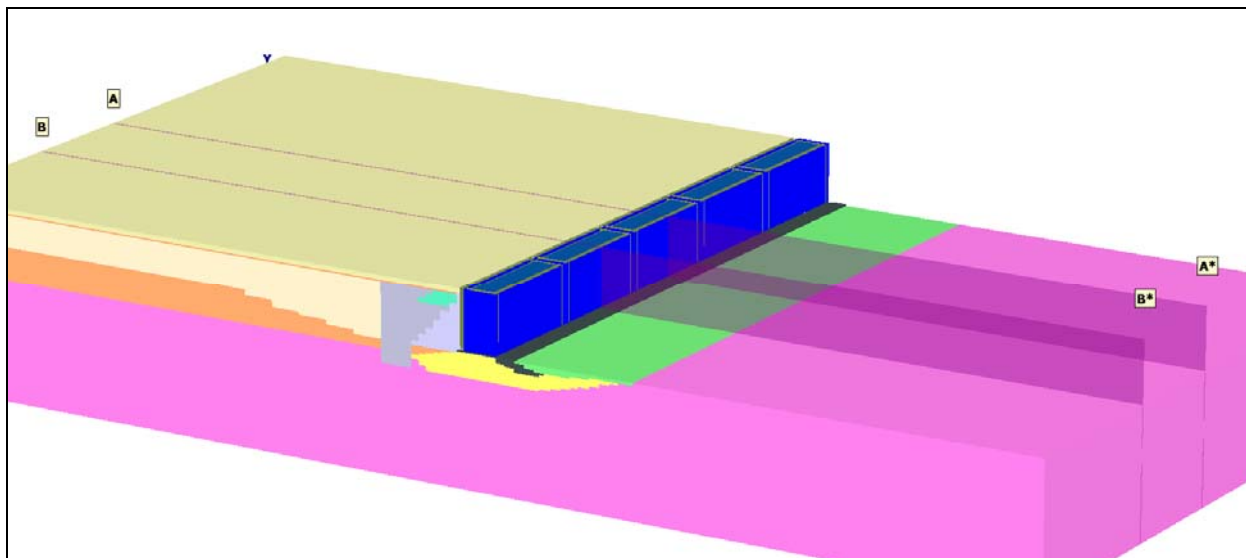


Figura 114. Secciones (A-A*) y (B-B*) realizadas en el modelo para la determinación de desplazamientos y tensiones en dichos planos.

De las figuras siguientes puede observarse, aparte de los desplazamientos sufridos por los cajones centrales del modelo, la interacción del terreno con los cajones. Tal como se ha comentado en las figuras anteriores, los desplazamientos horizontales estimados del cantil del muelle lado mar son de 3,0 cm en el cajón central y de 1,2 cm en un cajón adyacente a éste en su sección central (debe tenerse en cuenta que los cajones adyacentes al central sufren un giro debido a las cargas aplicadas y que los desplazamientos variarán en función de la sección transversal analizada). Para observar los movimientos tanto verticales como horizontales del cajón y en el interior del terreno de trasdós, se adjuntan a continuación dichas figuras para las secciones (A-A*) y (B-B*) consideradas.

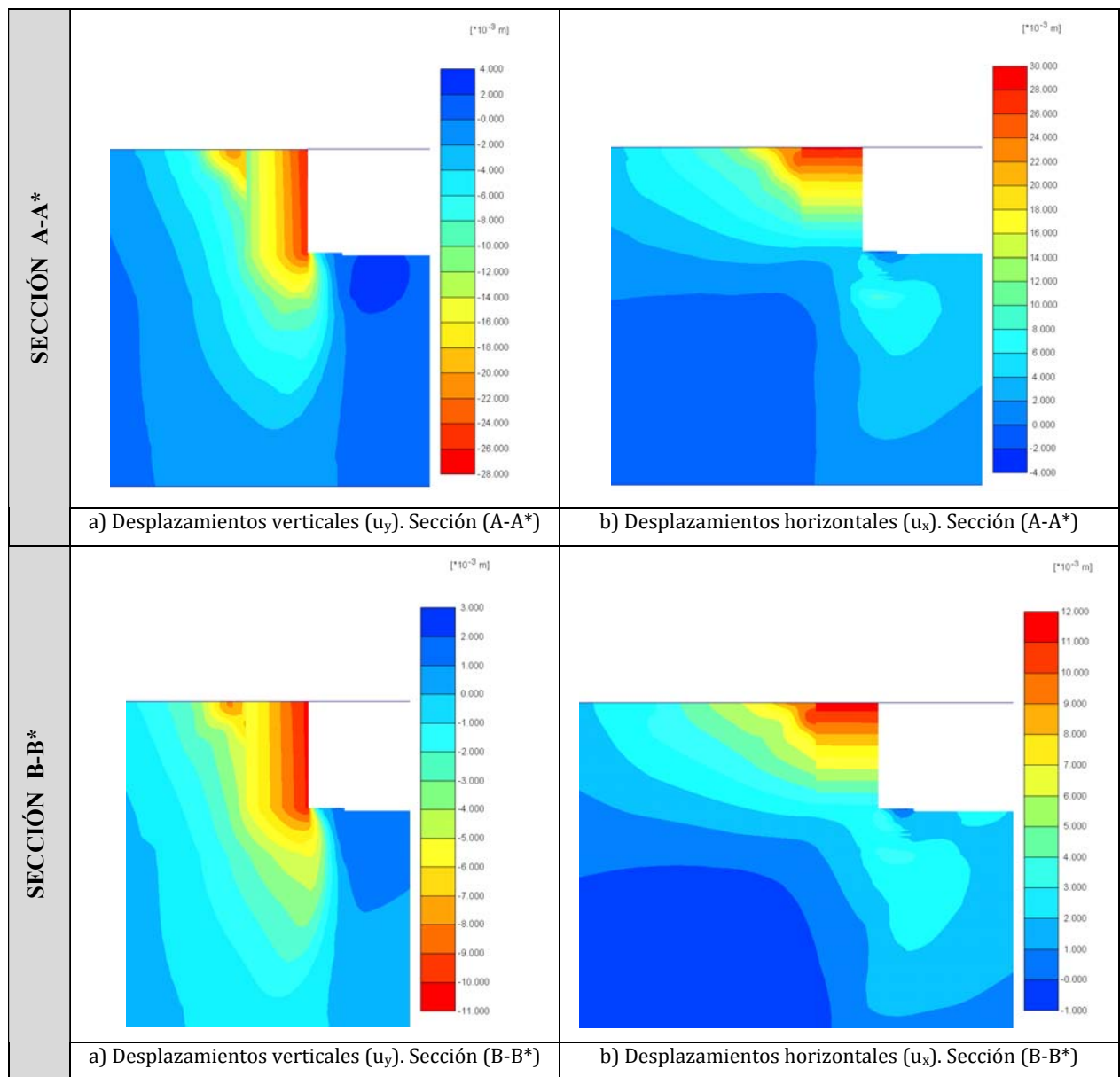


Figura 115. Desplazamientos verticales (u_y) y horizontales (u_x) debidos a las cargas de las grúas para las secciones analizadas.

Se adjunta a continuación la figura del exceso de presión de poro generada por la aplicación de las cargas de las grúas para la sección central del modelo (sección A-A*). Puede observarse de la distribución del exceso de presión de poro que la aplicación de la carga de la grúa supone un exceso de presión de poro de unos y 40 kN/m² bajo el cajón, en el terreno arcilloso por debajo de la banquetta.

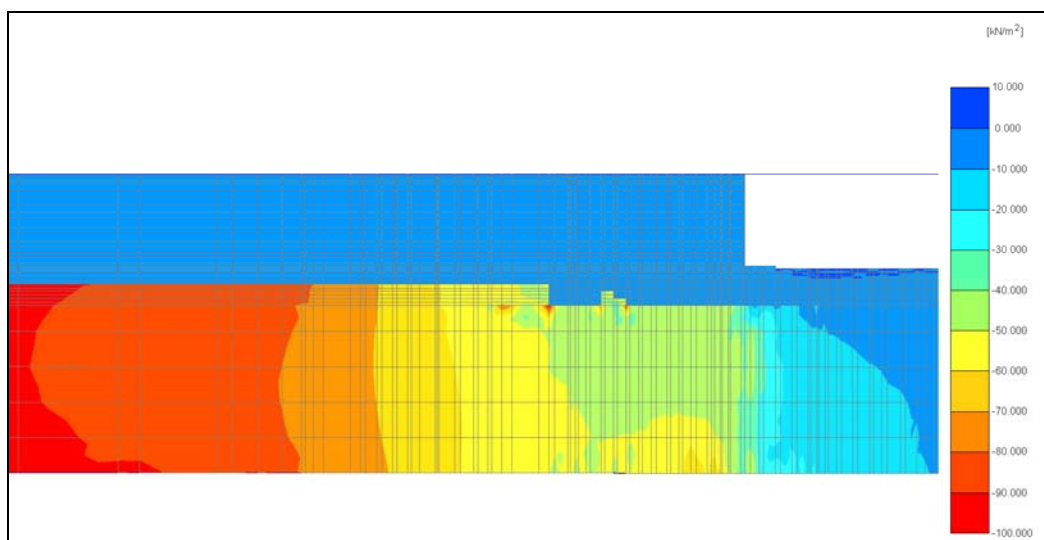


Figura 116. Distribución del exceso de presión de poro tras la aplicación de las cargas de las grúas.

Obtención del Factor de Seguridad

Para la obtención del FS se ha analizado el valor alcanzado del multiplicador ΣM_{stage} con la aplicación de unas cargas lineales equivalentes a las aplicadas pero mayoradas con un factor de 7, es decir, se ha cargado el cajón central con una carga lineal de 4900 kN/m y los adyacentes con unas cargas lineales de 1225 kN/m.

En la figura siguiente se adjunta la malla deformada tras la aplicación de la carga sobre los cajones.

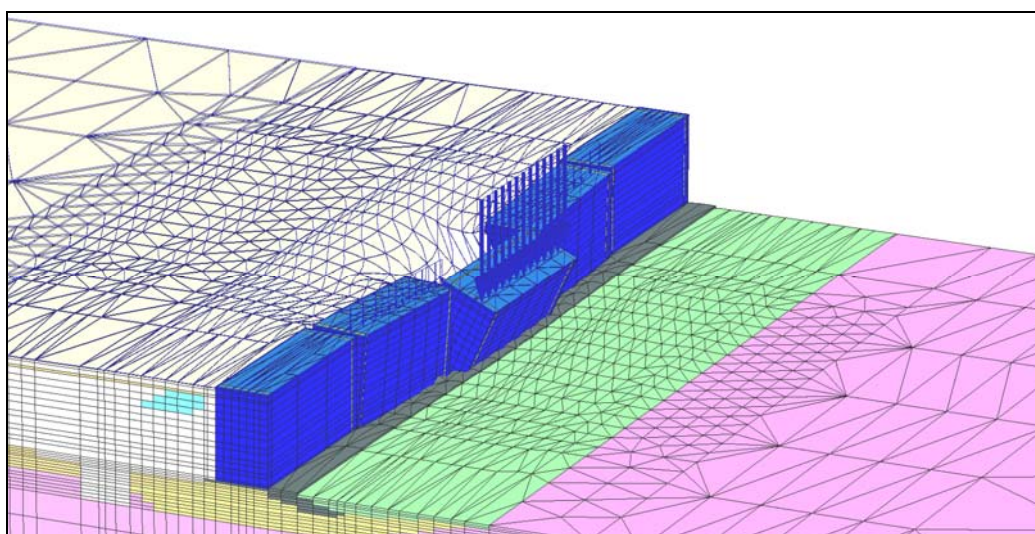


Figura 117. Malla deformada tras aplicación de carga lineal sobre los cinco cajones del muelle modelizado.

Para las cargas aplicadas sobre los tres cajones se ha alcanzado un valor del multiplicador $\Sigma Mstage$ de 0,647.

Por lo tanto, la carga última soportada por el terreno sería de 3170,3 kN/m en el cajón central y de 792,6 kN/m en los adyacentes. Considerando que el FS equivale a la carga última que soportará la estructura dividido por la carga aplicada (700 kN/m en cajón central y 175 en los adyacentes), el FS obtenido para la Hipótesis 5 es de **FS = 4,53**.

De la figura de las direcciones de las direcciones principales de deformación se extrae que la carga máxima de grúa admitida por el terreno viene determinada, como en todas las hipótesis anteriores analizadas, por la acumulación de tensiones que se genera al pie de los cajones.

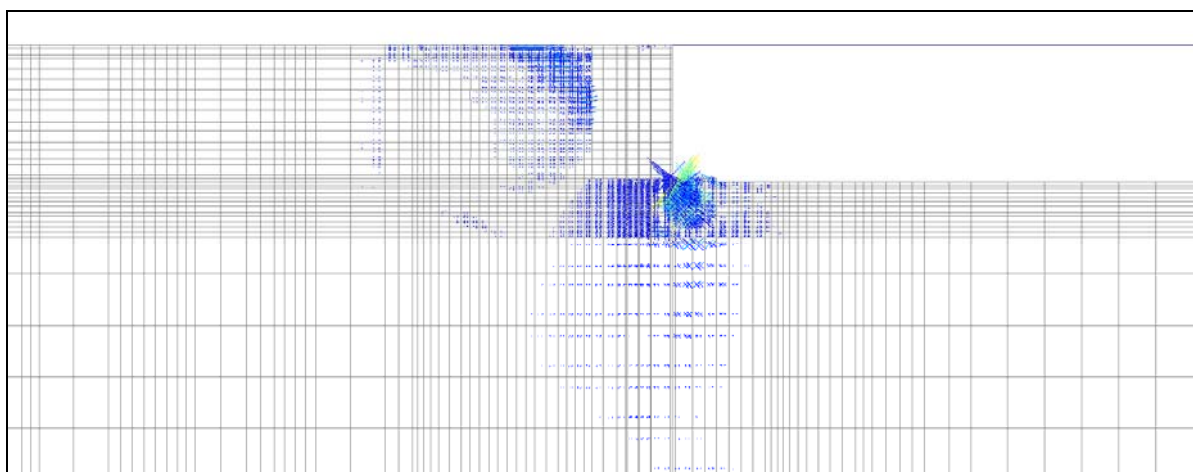


Figura 118. Direcciones principales de deformación tras aplicación de las cargas aplicadas (Sección A-A*).

6.3.2 RESULTADOS HIPÓTESIS 6 (0,5 GRÚA EN DOS CAJONES ADYACENTES)

Teniendo en cuenta la segunda hipótesis en función de la geometría de la grúa se ha considerado una carga lineal de 175 kN/m sobre dos cajones adyacentes a éste para tener en cuenta la hipótesis de que la carga de una grúa queda repartida entre dos cajones.

En la Figura 119 se pueden observar los desplazamientos totales en las fases consideradas no drenadas.

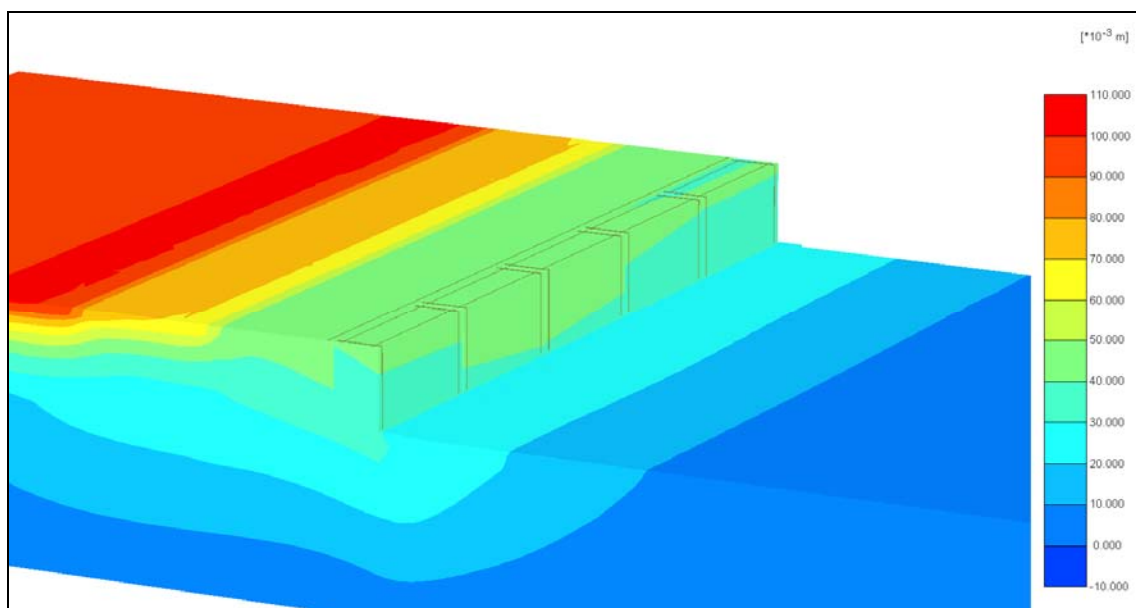


Figura 119. Desplazamientos totales tras la aplicación de las cargas en fase de servicio (caso no drenado).

A continuación se muestran los desplazamientos horizontales (u_x) y verticales (u_y) sufridos por los cajones y el terreno tras las cargas aplicadas (175 kN/m) en dos cajones consecutivos. Los desplazamientos máximos se darán en el cantil de los cajones lado mar y sus valores máximos estimados serán de 6,4 mm en horizontal (hacia lado mar) y de 2,5 mm en vertical.

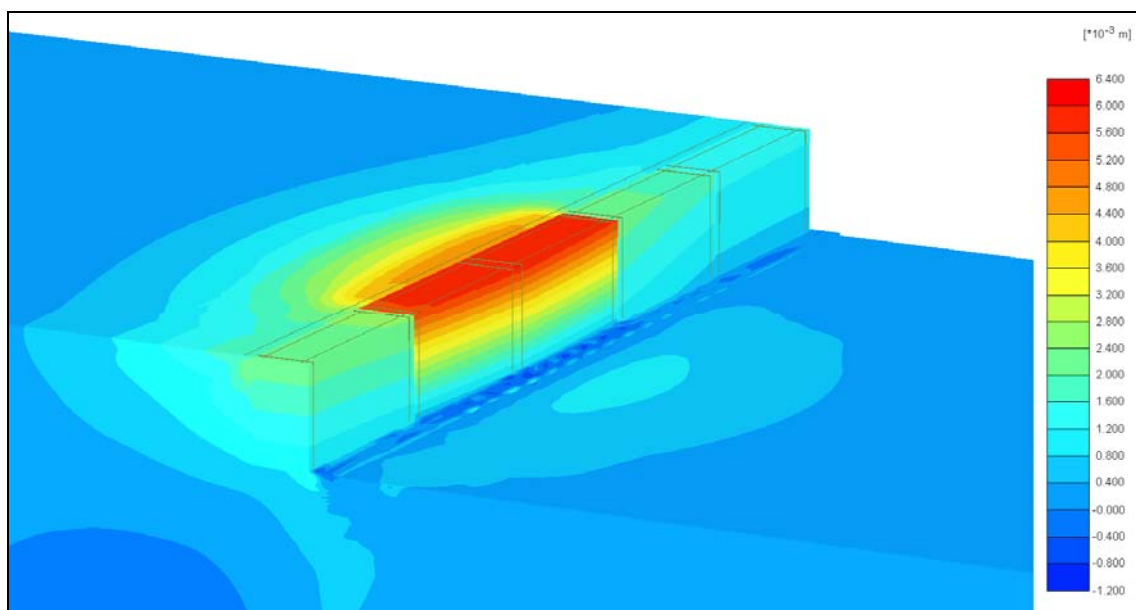


Figura 120. Desplazamientos horizontales (u_x) debidos a las cargas de grúa durante la fase de servicio (175 kN/m sobre dos cajones consecutivos).

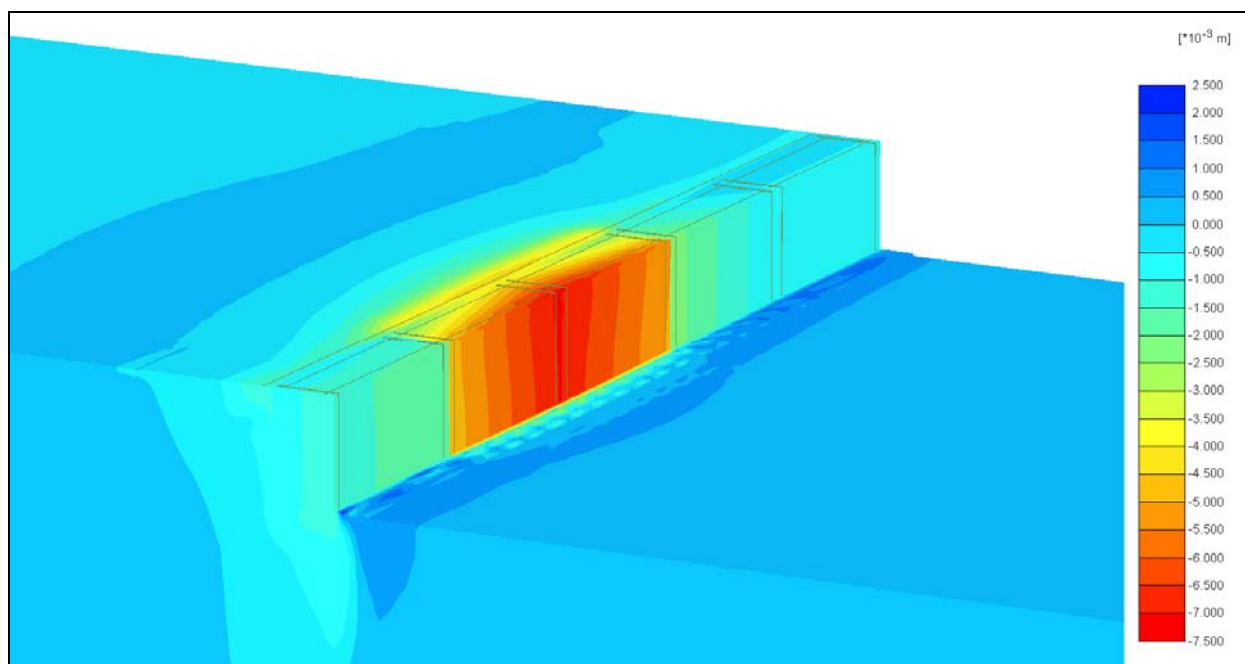


Figura 121. Desplazamientos verticales (u_v) debidos a las cargas de grúa durante la fase de servicio (175 kN/m sobre dos cajones consecutivos).

De la Figura 120 y Figura 121 puede observarse el comportamiento de los cajones como un sólido rígido, las líneas tanto de desplazamientos verticales como de desplazamientos horizontales son paralelas en los cajones cargados. Puede observarse también el efecto del borde del modelo, aunque al ser la carga de valor inferior que en la Hipótesis 2 (carga de 350 kN/m en dos cajones consecutivos), dicho efecto no es tan relevante.

Del corte realizado por el centro de los cajones en el sentido longitudinal al muelle pueden observarse los desplazamientos verticales y horizontales debidos a la aplicación de la carga de la grúa (175 kN/m sobre dos cajones consecutivos) tanto en los cajones como en el terreno. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

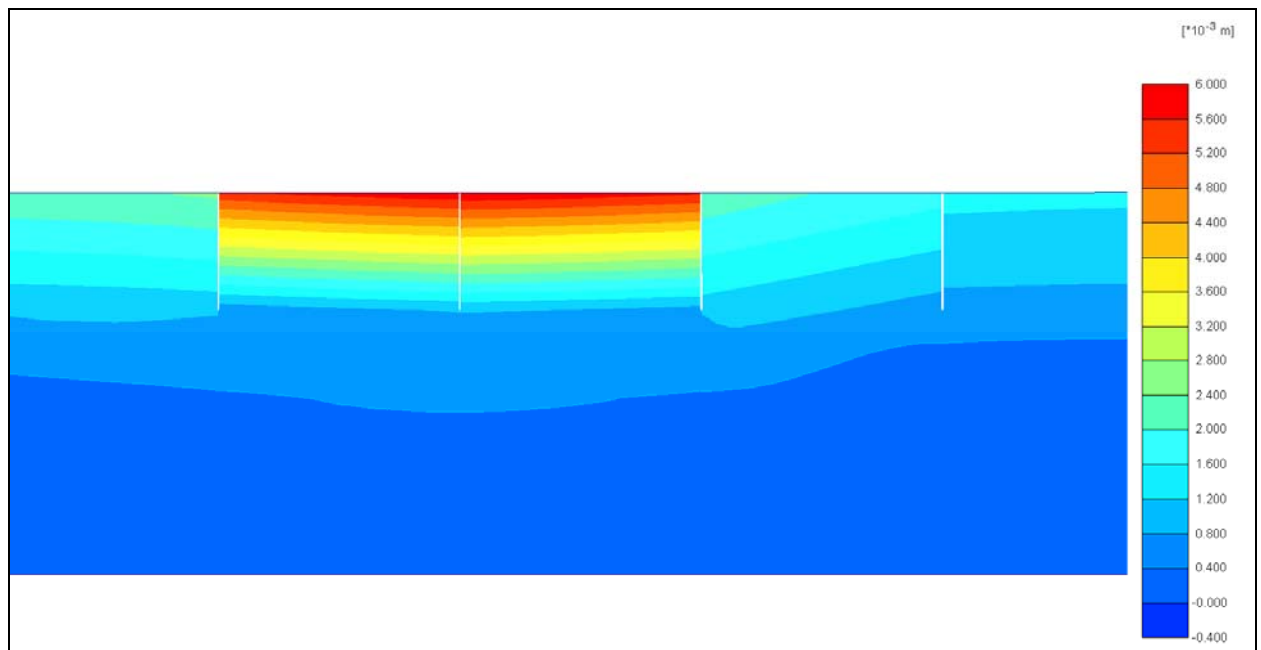


Figura 122. Desplazamientos horizontales (u_x) (175 kN/m sobre dos cajones consecutivos).

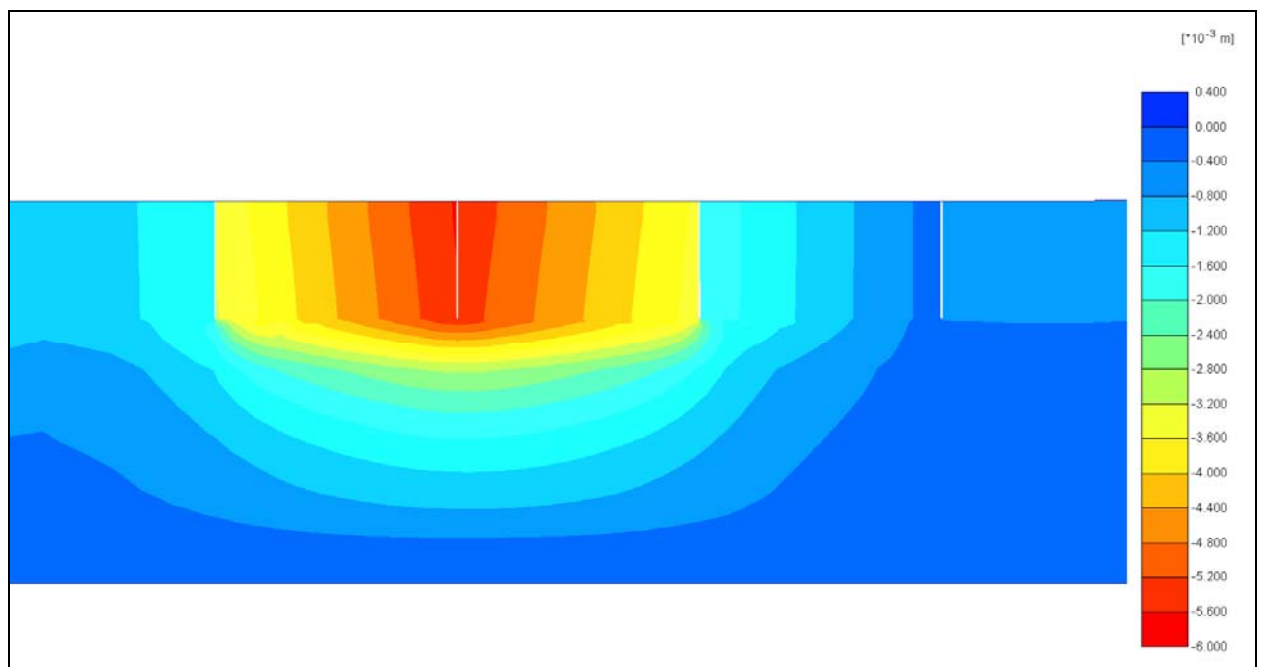


Figura 123. Desplazamientos verticales (u_y) (175 kN/m sobre dos cajones consecutivos).

En la figura siguiente se muestra el incremento de presión de poro introducida en el terreno debido a la aplicación de las cargas mediante fases no drenadas.

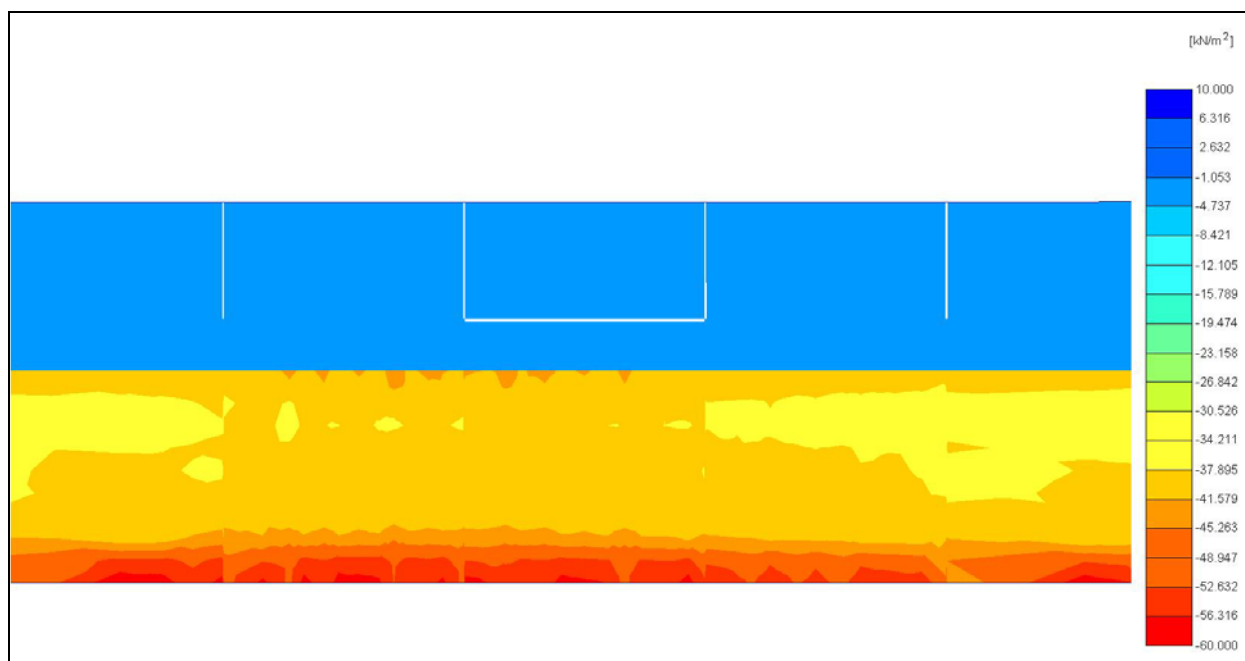


Figura 124. Incremento de presiones de poro introducidas por las cargas durante el proceso no drenado.

Obtención del Factor de Seguridad

Para la obtención del FS se ha analizado el valor alcanzado del multiplicador ΣM_{stage} con la aplicación de unas cargas lineales equivalentes a las aplicadas pero mayoradas con un factor de 18, es decir, se han cargado dos cajones consecutivos con una carga lineal de 3150 kN/m. Para las cargas aplicadas sobre los dos cajones se ha alcanzado un valor del multiplicador ΣM_{stage} de 0,773.

Por lo tanto, la carga última soportada por el terreno sería de 2436 kN/m en ambos cajones. Considerando que el FS equivale a la carga última que soportará la estructura dividido por la carga aplicada (175 en los dos cajones consecutivos), el FS obtenido para la Hipótesis 6 es de **FS = 13,92**.

7 COMPARACIÓN Y RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Se resumen en el presente apartado los resultados obtenidos tanto para la calibración realizada en el Apartado 5 como para los obtenidos del modelo 3D de cajones (Apartado 6).

Los factores de seguridad obtenidos para los modelos realizados en la calibración se resumen en la Tabla 23

Modelo	Carga última alcanzada	FS obtenido
Modelo 2D	1.659 kN/m	4,74
Modelo 3D (10,0 m de ancho)	1.635 kN/m	4,67
Modelo 3D (125,0 m de ancho)	1.731 kN/m	4,94

Tabla 23. Carga última y factores de seguridad de los 3 modelos realizados para la calibración.

Se extrae de la tabla anterior que la dispersión en los resultados es del 5,5%, por lo que se ha considerado admisible y, por lo tanto, el modelo calibrado.

Para las diferentes hipótesis de carga del modelo 3D realizado, aunque los resultados obtenidos se han ido adjuntando para cada una de las diferentes hipótesis de carga adoptadas, a continuación se realiza un breve resumen de los resultados obtenidos, tanto para las hipótesis de carga en función del número de cajones cargados (Hipótesis 1 a 4) como para las hipótesis de carga en función de la geometría de la grúa (Hipótesis 5 y 6).

En la siguiente tabla se recogen los factores de seguridad obtenidos para cada una de las hipótesis consideradas:

Hipótesis	Descripción	Carga Última (kN/m)	FS obtenido
Hipótesis 1	Carga sobre 1 cajón (350kN/m)	3.185	9,10
Hipótesis 2	Carga sobre 2 cajones (350kN/m)	2.450	7,00
Hipótesis 3	Carga sobre 3 cajones (350kN/m)	2.146	6,13
Hipótesis 4	Carga sobre 5 cajones (350kN/m)	1.712	4,90
Hipótesis 5	Carga sobre 3 cajones centrales (175 – 700 – 175 kN/m)	3.170 (central) 793 (adyacentes)	4,53
Hipótesis 6	Carga sobre 2 cajones consecutivos (175 – 175 kN/m)	2.436	13,92

Tabla 24. Factores de seguridad obtenidos para las diferentes hipótesis consideradas.

De los resultados obtenidos se puede observar la variación en los FS para las hipótesis de carga adoptadas. Puede observarse la consistencia de los resultados obtenidos comparando la Hipótesis 2 y la Hipótesis 6: ambas responden a la situación en que 2 cajones del modelo son cargados, pero en la Hipótesis 6 se aplica la mitad del valor de carga adoptada en la Hipótesis 2. Cabe destacar que el FS obtenido en la Hipótesis 6 es prácticamente el doble del obtenido en la Hipótesis 2. Observar también que la carga última es prácticamente la misma.

Pueden compararse también los FS obtenidos en la Hipótesis 3 y la Hipótesis 5 por tener la misma disposición de cargas (carga en los 3 cajones centrales). En este caso era evidente que el FS esperable en la Hipótesis 5 debía ser menor que en la Hipótesis 3, pero a partir del modelo 3D realizado puede determinarse en qué proporción.

Otro dato a destacar es el FS obtenido en la Hipótesis 4 (carga sobre los 5 cajones del modelo), ya que dicha hipótesis puede asimilarse al caso utilizado para la calibración del modelo. Puede observarse que el factor de seguridad obtenido es consistente con los obtenidos para la calibración (con una dispersión máxima de los resultados del 4,7%).

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de la presente tesina consiste en el análisis del efecto tridimensional al considerar como estructuras individuales los cajones que conforman una alineación de muelle, se muestra a continuación un gráfico en el que se puede observar la variación del factor de seguridad a estabilidad global de las estructuras y el terreno considerando diferentes las diferentes situaciones de carga analizadas en el Apartado 6.2 (Hipótesis de carga en función del número de cajones cargados).

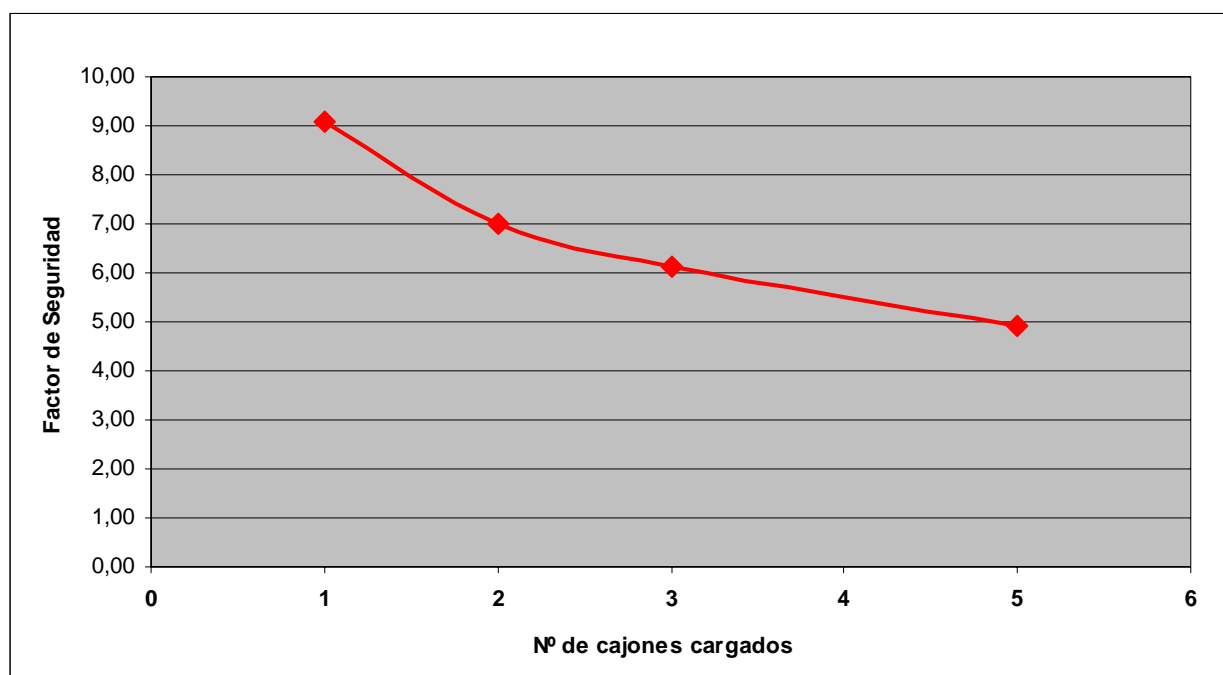


Gráfico 5. Evolución del Factor de Seguridad en función del número de cajones cargados.

Puede observarse del gráfico anterior que considerando el caso puramente tridimensional (sometiendo a carga un único cajón), se obtiene un factor de seguridad un 86% superior al que se obtiene considerando la situación de deformación plana (en este caso, cargando e involucrando todos los cajones en el fallo).

A continuación se muestra el exceso de presión de poro generado para cada una de las hipótesis de carga consideradas en función del número de cajones cargados. Dichas trayectorias responden al punto medio del cajón central del modelo (cota -30,0 m).

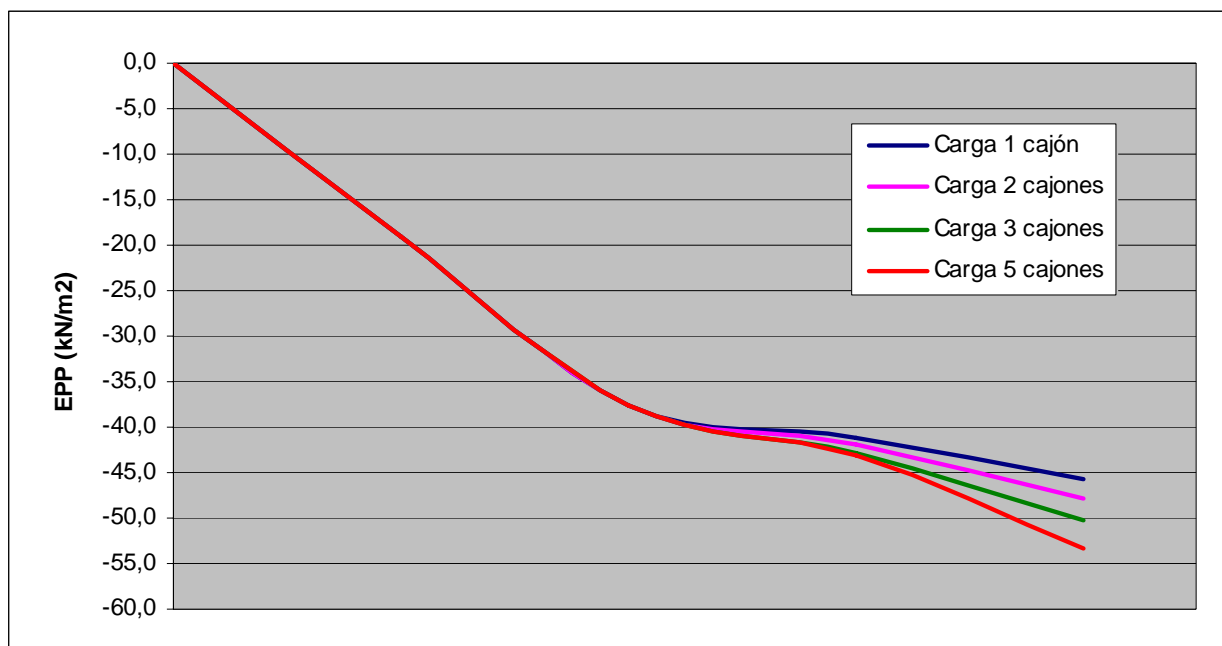


Gráfico 6. Evolución del exceso de presión de poro generada para las diferentes hipótesis consideradas.

Del gráfico anterior se desprende que la presión de poro generada también depende del efecto tridimensional de las cargas. Se obtienen presiones de poro mayores cuantos más cajones se someten a carga en el modelo. Es decir, al considerar el problema como una situación de deformación plana, se sobreestima el exceso de presiones generadas.

Puede observarse también que, como ocurre para el caso del factor de seguridad, el exceso de presión de poro generada bajo el cajón central para la Hipótesis 4 (Carga sobre 5 cajones) es prácticamente la misma que la obtenida de la calibración de los modelos (alrededor de 55,0 kPa), corroborándose que dicha hipótesis puede asimilarse al caso de deformación plana..

8 CONCLUSIONES

El cálculo de estabilidad del problema planteado mediante los modelos de cálculo efectuados con los códigos Plaxis 2D v8.6 y Plaxis 3D Foundation ha ayudado a comprender el efecto tridimensional que supone una alineación de muelle de cajones en que se considerara que no existe una superestructura que los solidarice, actuando éstos, como estructuras individuales frente a las cargas a los que se ven sometidos.

En base a los cálculos realizados se extraen las siguientes conclusiones:

- El análisis 3D representa mejor la geometría del problema, la distribución de tensiones y presiones intersticiales y el mecanismo de fallo observados en la realidad.
- La simulación del problema como una situación de deformación plana deja los cálculos del lado de la seguridad. Los factores de seguridad obtenidos a partir de la modelización del problema teniendo en cuenta el efecto tridimensional resultan siempre superiores. Esta consecuencia se deriva de tener en cuenta las fuerzas resistentes en toda la superficie real de la masa deslizante (mayor al caso de deformación plana), que aumentan la resistencia contra el deslizamiento.
- Las presiones de poro generadas por las cargas dependen del efecto tridimensional del problema. Cuantos más cajones se someten a carga en el modelo, mayores excesos de presiones se obtienen para un mismo punto. Por lo tanto, se concluye que al considerar el problema como una situación de deformación plana, se sobreestima el exceso de presiones generadas.

Como conclusión final cabe indicar que despreciar el efecto tridimensional es siempre conservador. Este criterio se justifica en estructuras largas en comparación con su altura: no obstante, en estructuras altas y cortas en profundidad como el caso que nos ha ocupado puede resultar conveniente estimar la influencia de las caras laterales de la rotura.

9 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A pesar de las dificultades en la configuración de una malla óptima para la realización de los cálculos, sería conveniente la realización de un estudio de sensibilidad en función de la malla de cálculo, al estar los resultados obtenidos enormemente sujetos a ésta.

A partir de las hipótesis de carga en el modelo 3D formado por la alineación de 5 cajones se ha podido observar la influencia de la proximidad del borde del modelo en los resultados obtenidos. Para eliminar dicho efecto borde sería conveniente la realización de un modelo con un número superior de cajones, de tal forma que éste no influyera en los resultados. Podrían realizarse entonces también, más casos de combinación de cargas.

Se ha considerado que los cajones que forman el muro actúan como estructuras individuales (no existe ningún elemento que los solidarice). Se propone estudiar el efecto tridimensional de una alineación de muelle formado de cajones ligados entre ellos mediante una superestructura y observar en qué medida mejora dicho elemento la seguridad de la estructura.

Tal como se ha comentado anteriormente, el programa empleado para la elaboración del modelo 3D (PLAXIS 3D Foundation) genera unos elementos de la malla de elementos finitos en forma prismática. Actualmente PLAXIS está trabajando en un nuevo programa "full 3D", en el que la malla de cálculo está formada por elementos tetraédricos. Asimismo, en dicho programa podrán también configurarse planos inclinados, claramente más indicados en la definición de la geometría que la aproximación que se ha realizado en la presente tesina. Por lo tanto, otra posible investigación sería la elaboración de un modelo equiparable al realizado y comparar los resultados obtenidos mediante el nuevo programa.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Análisis de estructuras portuarias mediante programas de estabilidad de taludes. Grupo de Trabajo 1 del Comité Técnico de Ingeniería Portuaria de la Asociación Técnica de Puertos y Costas. II Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas (2006).
- [2] Boonchai Ukritchon, M.ASCE; Andrew J. Whittle, M.ASCE; and C. Klangvijit. Calculations of Bearing Capacity Factor N_γ Using Numerical Limit Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 6, 2003.
- [3] Gourvenec, S. Failure envelopes for offshore shallow foundations under general loading. *Géotechnique* 57, No. 9, 715–728, 2007.
- [4] Gourvenec, S. Shape effects on the capacity of rectangular footings under general loading. *Géotechnique* 57, No. 8, 637–646, 2007.
- [5] Guangfeng Qu, Sean D. Hinchberger, K.Y. Lo. Case studies of three-dimensional effects on the behaviour of test embankments. Publicado en la NRC Research Press Web en cgj.nrc.ca, 2009.
- [6] Lyamin, A. V. et al. Two- and three-dimensional bearing capacity of footings in sand. *Géotechnique* 57, No. 8, 647–662, 2007.
- [7] PLAXIS 2D v8. Reference Manual (2002). Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- [8] PLAXIS 2D v8. Material Models Manual (2002). Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- [9] PLAXIS 3D Foundation v2. Reference Manual (2007). Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- [10] PLAXIS 3D Foundation v2. Material Models Manual (2007). Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- [11] Randolph, M. F. & Puzrin, A. M. Upper bound limit analysis of circular foundations on clay under general loading. *Géotechnique* 53, No. 9, 785–796, 2003.
- [12] ROM 0.5 – 05. Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias (2005).